

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ
ІНСТИТУТ імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

ФАКУЛЬТЕТ ЕЛЕКТРОНІКИ

(повна назва інституту/факультету)

КОНСТРУЮВАННЯ ЕЛЕКТРОННО-ОБЧИСЛЮВАЛЬНОЇ
АППАРАТУРИ

(повна назва кафедри)

«На правах рукопису»

УДК: 001.891.32;

62-523.2

«До захисту допущено»

Завідувач кафедри КЕОА



О.М.Лисенко

(підпис)

(ініціали, прізвище)

“18” грудня 2020 р.

Магістерська дисертація

зі спеціальності (спеціалізації) 172 – Телекомунікації та радіотехніка

(код і назва спеціальності)

на тему: Метод підвищеної ефективності керування BLDC-двигуном

Виконав: студент 6 курсу, групи ДК-91мп

(шифр групи)

Тимошенко Сергій Вікторович

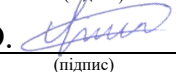
(прізвище, ім'я, по батькові)



(підпис)

Науковий керівник доцент кафедри КЕОА, доц., к.т.н. Лебедев Д.Ю.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, прізвище та ініціали)



(підпис)

Консультант

(назва розділу) (науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

(підпис)

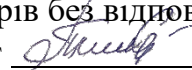
Рецензент Гол. інженер Шепетько А.П.

(посада, науковий ступінь, вчене звання, науковий ступінь, прізвище та ініціали)



(підпис)

Засвідчую, що у цій магістерській
дисертації немає запозичень з праць
інших авторів без відповідних посилань.

Студент 

(підпис)

Київ – 2020 року

**Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут
імені Ігоря Сікорського»**

Інститут/факультет _____ електроніки
(повна назва)

Кафедра _____ конструювання електронно-обчислювальної апаратури
(повна назва)

Рівень вищої освіти – другий (магістерський) за освітньо-професійною програмою

Спеціальність (спеціалізація) 172 – Телекомунікації тарадіотехніка
(код і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ
Завідувач кафедри

 _____ Лисенко О.М.
(підпис) (ініціали, прізвище)

«04» листопада 2019 р.

ЗАВДАННЯ

на магістерську дисертацію
студенту Тимошенку Сергію Вікторовичу
(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема дисертації Метод підвищеної ефективності керування BLDC-двигуном

науковий керівник дисертації Лебедев Денис Юрійович, к.т.н., доцент
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом по університету від «05» листопада 2020р. № 3241-с

2. Строк подання студентом дисертації _____ 15.12.2020р.

3. Об'єкт дослідження процес керування безколекторним двигуном

4. Предмет дослідження методи керування безколекторним двигуном та їх алгоритми

5. Перелік завдань, які потрібно розробити 1. Аналіз існуючих методів керування безколекторним двигуном 2. Обґрунтування вибору трапецієподібного методу керування 3. Оптимізація та покращення трапецієподібного методу керування. 4. Розроблення стартап-проекту

6. Перелік графічного (ілюстративного) матеріалу

Презентація у форматі PowerPoint

7. Орієнтовний перелік публікацій 1 публікація

8. Консультанти розділів дисертації*

Розділ	Прізвище, ініціали та посада консультанта	Підпис, дата	
		завдання видав	завдання прийняв

9. Дата видачі завдання 04.11.2019р.

Календарний план


№ з/п	Назва етапів виконання магістерської дисертації	Строк виконання етапів магістерської дисертації	Примітка
1	Аналіз тематичної літератури	04.11.19—15.04.20	
2	Обґрунтування вибору та дослідження трапецієподібного методу керування	16.04.20—29.05.20	
3	Модифікація та покращення методу	30.05.20—30.06.20	
4	Моделювання обраного рішення	1.07.20—15.10.20	
5	Розробка стартап-проекту	16.10.20—18.11.20	
6	Оформлення дисертації	19.11.20—10.12.20	

Студент



(підпис)

Науковий керівник дисертації



(підпис)

Тимошенко С.В.

(ініціали, прізвище)

Лебедев Д.Ю.

(ініціали, прізвище)

РЕФЕРАТ

Магістерська дисертація складається з 75 сторінок, в якій міститься 37 рисунків, 26 таблиць, використано 26 джерел.

Актуальність. Наразі відомо, що область створення і проектування нових видів електричних транспортних засобів розвивається дуже швидко та інтенсивно. В таких транспортних засобах зазвичай використовуються безколекторні двигуни, які в свою чергу мають багато переваг над двигунами, що мають колекторний вузол. Керування безколекторними двигунами відбувається за допомогою різних методів. Кожен з яких має свої переваги та недоліки. Саме тому розробка нових та удосконалення вже існуючих методів є важливим та **актуальним** завданням.

Метою дисертаційної роботи є підвищення надійності та оптимізація системи керування безколекторним двигуном.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішувалися наступні

задачі:

- проаналізовані вже існуючі методи, виявлено їх недоліки та переваги;
- обґрунтовано вибір в якості базового та для подальшої оптимізації трапецієподібний метод керування;
- модифіковано трапецієподібний метод керування та проведена його симуляція;
- виконано проектування та розробка стартап-проекту

Об'єктом дослідження є процес керування безколекторним двигуном.

Предметом дослідження є методи керування безколекторним двигуном та їх алгоритми.

Методами дослідження є трапецієподібний метод, бездатчиковий, векторний та метод послаблення поля.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження полягає в наступному:

- Удосконалено трапецієподібний метод керування безколекторним двигуном, який відрізняється від відомого додаванням ПІ-регулятора та використанням гістерезисного керування струмом, що дозволяє підвищити стабільність системи при зміні навантаження та забезпечити її надійність шляхом обмеження струму у заданому діапазоні.

- Розроблено Simulink-модель BLDC-двигуна, яка реалізує відомий та удосконалений методи керування, що дозволило шляхом моделювання з та без запропонованих нововведень і порівняльного аналізу отриманих результатів підтвердити ефективність запропонованих рішень.

Практичне значення отриманих результатів визначається запропонованою оптимізацією та модифікацією вже існуючого відомого методу керування безколекторного двигуна.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційних досліджень апробовано на Міжнародній науково-технічній XIII конференції молодих вчених «Електроніка-2020», м. Київ, квітень, 2020р.

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 1 друковану працю в збірнику матеріалів конференції (див. Додаток А):

Тимошенко Сергій. Електронне керування платформою з корисним навантаженням // «Електронна та акустична інженерія. Том №3», м. Київ, 2020р. – С.23-28

Ключові слова: методи керування, безколекторний двигун, гістерезисне керування, трапецієподібний метод.

ABSTRACT

The master's dissertation consists of 75 pages, which contains 37 figures, 26 tables, 26 sources are used.

The relevant. It is now known that the field of creation and design of new types of electric vehicles is developing very rapidly and intensively. Such vehicles usually use brushless motors, which in turn have many advantages over engines that have a brushed motors unit. Brushless motors are controlled by various methods. Each of which has its advantages and disadvantages. That is why the development of new and improvement of existing methods is an important and **relevant** task.

The purpose. is to increase the reliability and productivity of the brushless dc motor control system. To achieve this goal in the work solved the following **tasks**:

- existing methods are analyzed, their disadvantages and advantages are revealed;
- the choice as a basic and for further optimization trapezoidal control method is substantiated;
- the trapezoidal control method was modified and its simulation was performed;
- design and development of a startup project was performed.

The object of research is the brushless dc motor process of control.

The subject of research is the brushless dc motor control methods and their algorithms.

The **research** methods are trapezoidal method, sensorless method.

The scientific novelty of the results of the study is as follows:

- Improved trapezoidal method of bldc-motor control, which differs from the known addition of PI-regulator and the use of hysteresis current control, which increases the stability of the system when the load changes and ensure its reliability by limiting the current in a given range.
- Developed Simulink-model BLDC-engine, which implements known and

improved control methods, which allowed by modeling with and without the proposed innovations and comparative analysis of the results to confirm the effectiveness of the proposed solutions.

The practical significance of the obtained results is determined by the proposed optimization and modification of the already existing known method of control of the brushless dc motor.

Approbation of dissertation results. The results of dissertation research were tested at the XIII International Scientific and Technical Conference of Young Scientists "Electronics 2020", Kyiv, April, 2020.

Publications. Based on the materials of the dissertation, 1 printed work was published in the collection of conference materials (see Appendix A):

Serhii Tymoshenko. Electronic control of the platform with a payload // "Electronic and acoustic engineering. Volume №3 », Kyiv, 2020. - P.23-28

Key words: control methods, brushless motor, hysteresis control, trapezoidal method.

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень.....	3
Вступ.....	4
Розділ 1. АНАЛІЗ ІСНУЮЧИХ МЕТОДІВ КЕРУВАННЯ BLDC-ДВИГУНОМ.....	7
1.1 Огляд конструкції електродвигунів.....	7
1.2 Проблематика при керуванні безколекторними двигунами.....	10
1.3 Огляд, переваги та недоліки існуючих методів керування BLDC-двигуном.....	10
1.3.1 Трапецієподібний алгоритм керування.....	10
1.3.2 Метод послаблення поля.....	14
1.3.3 Методи керування без датчиків.....	16
1.3.4 Скалярний метод керування.....	17
1.3.5 Векторне керування двигуном.....	18
1.4 Патентний пошук.....	19
1.5 Формування функціональної частини на основі проведеного аналізу.....	22
Розділ 2. ОПТИМІЗАЦІЯ ТА ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ МЕТОДУ КЕРУВАННЯ.	25
2.1 Дослідження трапецієподібного методу керування.....	25
2.2 Оптимізація за допомогою ПІ-регулятора.....	31
2.3 Використання гістерезисного керування струмом.....	34
Розділ 3. ДОСЛІДЖЕННЯ SIMULINK-МОДЕЛІ BLDC-ДВИГУНА В MATLAB.....	40
3.1 Створення та симуляція Simulink-моделі BLDC-двигуна в Matlab.....	40
3.2 Симуляція Simulink-моделі з додаванням ПІ-регулятора.....	45

3.3 Симуляція Simulink-моделі з використанням гістерезисного керування струмом.....	47
Розділ 4. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ.....	50
4.1 Опис ідеї розробки.....	50
4.2 Технологічний аудит ідеї проекту.....	53
4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту.....	54
4.4 Розроблення ринкової стратегії.....	64
4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту.....	66
4.6 Можливі області застосування та очікуваний ефект.....	70
Загальні висновки.....	71
Список використаних джерел.....	73
ДОДАТОК А. Матеріали публікації	

Перелік умовних позначень

IGBT	- insulated gate bipolar transistor
BLDC	- brushless direct current
БКЕПС	- безколекторний електродвигун постійного струму
ККД	- коефіцієнт корисної дії
ШІМ	- широтно-імпульсна модуляція
ПЛС	- програмована логічна
ПІ-регулятор	- пропорційно-інтегральний регулятор
ГКС	- гістерезисне керування струмом
ЕРС	- електрорушійна сила

Вступ

Актуальність. Постійне здешевлення магнітних матеріалів, а також прискорений розвиток апаратних засобів систем управління і пристроїв силової електроніки, а саме перетворювачів на транзисторах з ізольованим затвором IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor), зробили можливим застосування безколекторного електродвигуна постійного струму (BLDC, БКЕПС) в тих галузях, де зазвичай застосовувалися тільки машини постійного струму або спеціальні асинхронні двигуни. Це пояснюється рядом переваг БКЕПС як конструктивних, так і техніко-експлуатаційних в порівнянні з іншими типами електричних двигунів. До таких переваг належать відсутність ковзних (рос. “скользящих”) контактів та інших вузлів електричних машин, які потребують обслуговування. Вентильний двигун має жорстку механічну характеристику і широкий діапазон регулювання частоти обертання (1:10 000 і більше). Основні переваги таких двигунів обумовлені відсутністю колектора – тобто механічного контакту, через який передається електроенергія в ротор. В результаті з двигунів виключений найменш надійний елемент – щітки колектора, які періодично зношуються, «залипають», тощо. Щітки колектора, також схильні до забруднення і зносу [1]. Безколекторний електродвигун володіє мінімальними масо-габаритними показниками, струмами холостого ходу і більш високою продуктивністю, ніж щіткові електродвигуни такого ж розміру. Також BLDC-двигун має велику перевантажувальну здатність по моменту і високу швидкодію по моменту в перехідних процесах [2].

Завдяки перерахованим вище перевагам, безщіткові електродвигуни знайшли широке застосування в багатьох галузях промисловості таких як: машинобудування, робототехніка, вимірювальна техніка та інші.

За допомогою мікропроцесорних систем управління можлива реалізація алгоритмів управління безколекторним двигуном постійного струму.

Керування безколекторними двигунами відбувається за допомогою різних методів. Кожен з яких має свої переваги та недоліки. Саме тому розробка нових, модифікація, оптимізація та удосконалення вже існуючих методів є важливим та **актуальним** завданням на сьогоднішній день.

Метою дисертаційної роботи є підвищення надійності та продуктивності системи керування безколекторним двигуном.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішувалися наступні **задачі:**

- проаналізовані вже існуючі методи, виявлено їх недоліки та переваги;
- обґрунтовано вибір в якості базового та для подальшої оптимізації трапецієподібного методу керування;
- модифіковано трапецієподібний метод керування та проведена його симуляція;
- виконано проектування та розробка стартап-проекту

Об'єктом дослідження є процес керування безколекторним двигуном.

Предметом дослідження є методи керування безколекторним двигуном та їх алгоритми.

Методами дослідження є трапецієподібний метод та бездатчиковий метод.

Наукова новизна отриманих результатів дослідження полягає в наступному:

- Удосконалено трапецієподібний метод керування безколекторним двигуном, який відрізняється від відомого додаванням ПІ-регулятора та використанням гістерезисного керування струмом, що дозволяє підвищити стабільність системи при зміні навантаження та забезпечити її надійність шляхом обмеження струму у заданому діапазоні.
- Розроблено Simulink-модель BLDC-двигуна, яка реалізує

відомий та удосконалений методи керування, що дозволило шляхом моделювання з та без запропонованих нововведень і порівняльного аналізу отриманих результатів підтвердити ефективність запропонованих рішень.

Практичне значення отриманих результатів визначається запропонованою оптимізацією та модифікацією вже існуючого відомого методу керування безколекторного двигуна.

Апробація результатів дисертації. Результати дисертаційних досліджень апробовано на Міжнародній науково-технічній XIII конференції молодих вчених «Електроніка-2020», м. Київ, квітень, 2020р.

Публікації. За матеріалами дисертації опубліковано 1 друковану працю в збірнику матеріалів конференції (див. Додаток А):

Тимошенко Сергій. Електронне керування платформою з корисним навантаженням // «Електронна та акустична інженерія. Том №3», м. Київ, 2020р. – С.23-28

Структура дисертації. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів основної частини, висновків, списку використаних літературних джерел та додатків. Загальний об'єм дисертації складає 75 сторінок, із них 66 сторінок основного тексту, 37 рисунків, 26 таблиць, список використаних літературних джерел на 3 сторінках, що містить 26 найменувань та 1 додаток.

Ключові слова: методи керування, безколекторний двигун, гістерезисне керування, трапецієподібний метод.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ ПО ТЕМІ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1 Огляд конструкції електродвигунів

Існує два основних типи електродвигунів: колекторний та безколекторний. Визначальною особливістю **колекторних двигунів** є наявність щітково-колекторного вузла, що забезпечує рух валу. Головною зовнішньою відмінністю колекторного двигуна від безколекторного – це наявність у нього двох виводів живлення замість трьох. Колекторний двигун складається з рухомої частини - ротора і нерухомої – статора. Колектор – це набір контактів, що розташовані на роторі та щітки (ковзаючі контакти), розташовані поза місцем розташування ротору і притиснуті до колектора. Ротор з обмотками обертається усередині статора. Щітки використовуються, щоб передавати електричну енергію на котушки обертаючих обмоток ротора. Зазвичай, колекторні електродвигуни, мають всього два дроти (позитивний і негативний), якими двигун підключається до регулятора швидкості [3].

Принцип роботи колекторного двигуна полягає в наступному. Електричний струм, що поступає на обмотки якоря створює в ньому електромагнітне поле, яке має два протилежні полюси на кінцях. Схематично це зображено на рисунку 1.1

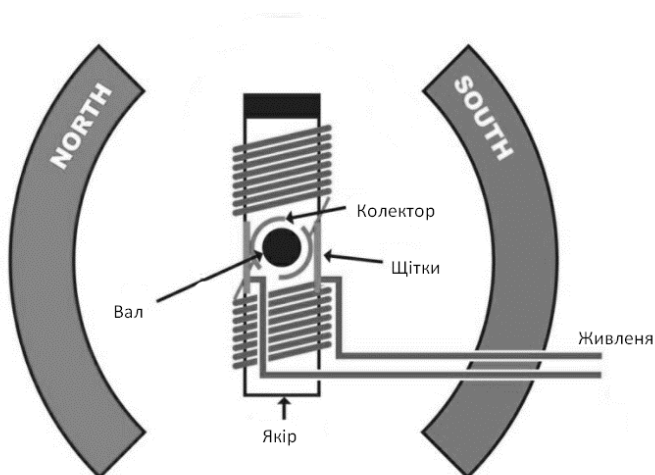


Рисунок 1.1 – Структурна побудова колекторного двигуна

Електромагнітне поле, яке виникає в будь-якій з обмоток якоря, взаємодіє з кожним з полюсів магнітів статора і пускає в хід (обертання) сам якір. Далі струм, через колектор і щітки переходить до наступної обмотки і так послідовно, переходячи від однієї обмотки якоря до іншої, вал електродвигуна спільно з якорем обертається, але лише до тих пір, поки до нього подається напруга.

Колекторні двигуни знайшли своє призначення в таких сферах, як автомобілебудування, побутова техніка, в різноманітних станках (токарний, фрезерний, тощо). Колекторні двигуни малих розмірів та потужності також використовуються і в створенні дитячих іграшок.

Переваги колекторних двигунів:

1. Не висока ціна
2. Простота в керуванні
3. Не великі струми при запуску

Недоліки колекторних двигунів. Один з найбільших недоліків колекторних двигунів – це обмежений ресурс роботи. Зумовлено такий недолік через наявність щітково-колекторного вузла. Щітки розташовуються близько до колектору і в результаті великих обертів, в тому місці де виникає дотик, виникає тертя. Таким чином з плином часу щітки зношуються. В певний момент часу може виникнути іскріння під час перегріву. Використання такого двигуна в більш агресивних умовах, таких як пил та волога, слугуватиме каталізатором для зношення щіток та колектору.

Безколекторний двигун. В безколекторних двигунів відсутні щітки та колектор, а магніти розташовуються навколо валу і виконують роль ротора. Обмотки знаходяться навколо магніту і мають декілька полюсів. На роторі деяких безколекторних двигунів розташовуються сенсори (датчики Холла), які будуть контролювати його положення та передавати цю інформацію на керуючий контролер. Контролер працює в парі з регулятором швидкості

обертання. На рисунку 1.2 зображено структурну побудову безколекторного двигуна.

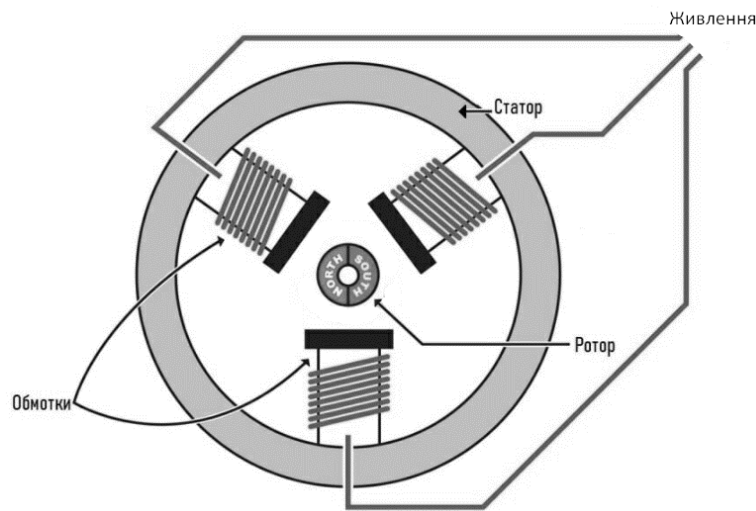


Рисунок 1.2 – Структура безщіткового двигуна

В безколекторному двигуні роль перемикання струму виконує комутатор на напівпровідникових ключах, а саме – на транзисторах. Коли транзистори в певній послідовності вмикають обмотки статора, з'являється обертаюче магнітне поле, яке в свою чергу взаємодіє з полем магнітів ротора. Для перемикання транзисторних ключів, обов'язково потрібен контролер. Безколекторні двигуни дуже широко використовуються при створенні електричних транспортних засобів. Майже на всіх електросамокатах, велосипедах, тощо, розташовують безщіткові двигуни. Завдяки високому ККД і невеликим габаритним розмірам, а також відсутності колекторного вузла, дозволяє застосовувати безколекторний двигун в небезпечних місцях, а також в місцях з підвищеною вологістю, без побоювань замикань, іскор або пожежі через дефекти в щітковому вузлі [4].

Переваги. Найбільш суттєва перевага перед колекторними двигунами – це відсутність колекторного вузла. Таким чином, стабільність і надійність підвищується в рази. Високий ККД двигуна.

Недоліки. Потрібна додаткова електроніка, щоб керувати двигуном.

1.3 Проблематика при керуванні безколекторними двигунами

Керування безколекторними двигунами здійснюється електронно, за допомогою подачі на обмотки статора електричного сигналу необхідної частоти і амплітуди, пропорційно бажаній швидкості обертання ротору. Існує кілька способів генерації таких сигналів: трапецієподібний алгоритм керування двигуном, керування двигуном без датчиків, векторний алгоритм керування, тощо.

Керування безколекторним двигуном є досить складним завданням, яке вирішується використанням блоку управління, що складається з двох вузлів – модуля комутації та мікропроцесорного модуля.

Блок управління є невід'ємною частиною приводу, що використовує безколекторний двигун, оскільки даний вид двигунів, сам по собі, не може бути приведений в обертання за допомогою подачі напруги на обмотки. Для приведення в рух BLDC-двигуна, потрібна подача «обертового» магнітного поля, яке формує послідовно перемикаючий вектор тяжіння полюсів ротора до відповідних обмоток статора по колу.

Для більшості конструкцій безколекторних двигунів також характерно наявність додаткового компоненту – це датчики положення ротора, які є сигналізаторами положення полюсів ротора щодо відповідних обмоток. В якості датчиків найчастіше використовуються датчики Холла з довгою зоною спрацювання, які дозволяють реалізувати автоматизовану комунікацію обмоток для подачі на них відповідної позитивної або негативної напруги, що в свою чергу призведе до обертання ротору.

1.4 Огляд, переваги та недоліки існуючих методів керування BLDC-двигуном.

1.4.1 Трапецієподібний алгоритм керування

Одним з таких алгоритмів є трапецієподібний. Даний спосіб управління є найбільш простим, що робить його недорогим і, отже, найбільш поширеним.

При трапецієподібному управлінні здійснюється управління алгоритмом підключення фаз двигуна до живлення за допомогою інвертора. Живлення визначається скважністю імпульсів ШІМ. Схема керування безколекторним двигуном постійного струму представлена на рисунку 1.3.

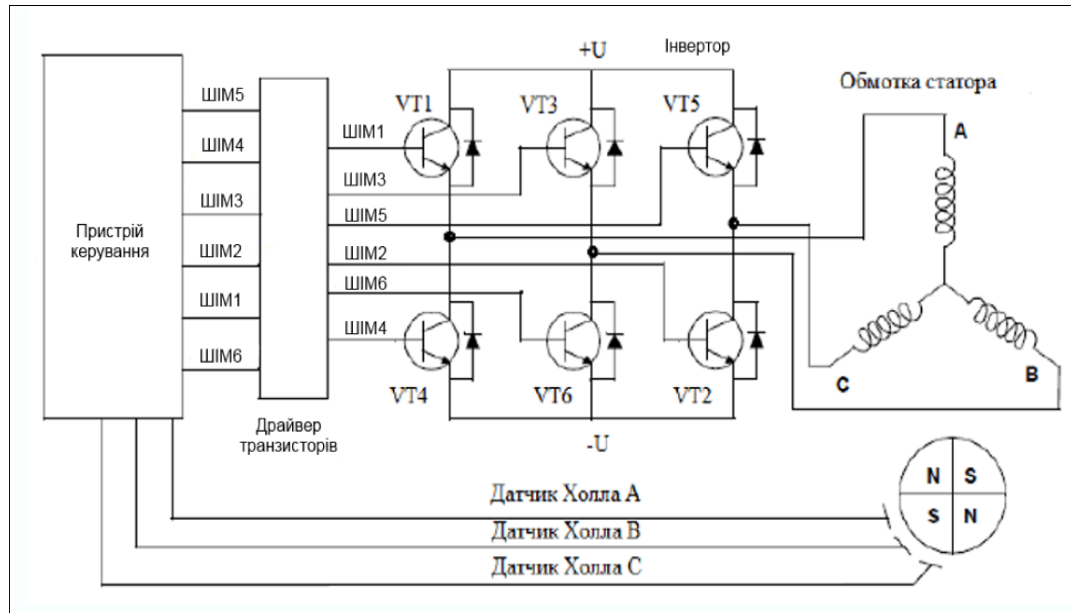


Рисунок 1.3 – Система керування трифазним двигуном

Інформація про стан ротора надходить на мікроконтролер (МК) (пристрій управління) з датчиків положення ротора на ефекті Холла. В якості пристрою керування також може виступати програмована логічна інтегральна схема (ПЛІС). Перемикання вихідних пристроїв здійснюється в комутаторі, який перемикає обмотки двигуна і використовує ШІМ [5]. Пристрій керування не може управляти силовими ключами (VT1-VT6) інвертора безпосередньо, так як є «слабким місцем» частини системи. Тому в схемі присутні драйвери транзисторів, які представляють собою підсилювачі потужності і несуть в собі функцію безпосереднього управління силовими ключами інвертора. Обмотки трифазного вентильного двигуна з'єднані зіркою і підключені до інвертору.

Інвертор представляє собою трифазний міст з силових ключів. Пристрій управління формує імпульси змінної тривалості (ШІМ1-ШІМ6) для комутації обмоток статора і управління швидкістю двигуна.

За допомогою інвертора обмотки вентильного двигуна можна підключити до високого (+ U) або низького рівня (-U) живлення. Час підключення, яке визначається скважністю ШІМ, визначає середню напругу, що прикладається до обмоток статора вентильного двигуна і, тим самим, регулює швидкість. При цьому один електричний цикл може не збігатися з повним механічним циклом обороту ротора.

Необхідна кількість електричних циклів відповідає завершенню механічного циклу і дорівнює числу пар полюсів ротора. Протягом кожного з цих шести етапів, напруга прикладається до двох з трьох фазових обмоток. На рисунку 1.2 показана послідовність увімкнення обмоток. Фазовий зсув напруги має місце в інтервалі 60 градусів. Протилежна електрорушійна сила забезпечує переходи через нульовий рівень при знеструмленому стані кожної обмотки.

Системою керування здійснюється зчитування сигналів з датчиків положення ротора на ефекті Холла для шести-ступінчатої комутаційної послідовності (six state machine), наприклад, за годинниковою стрілкою. Необхідне поєднання силових ключів (VT1-VT6) системи управління для відповідних переключень наведені в таблиці 1.

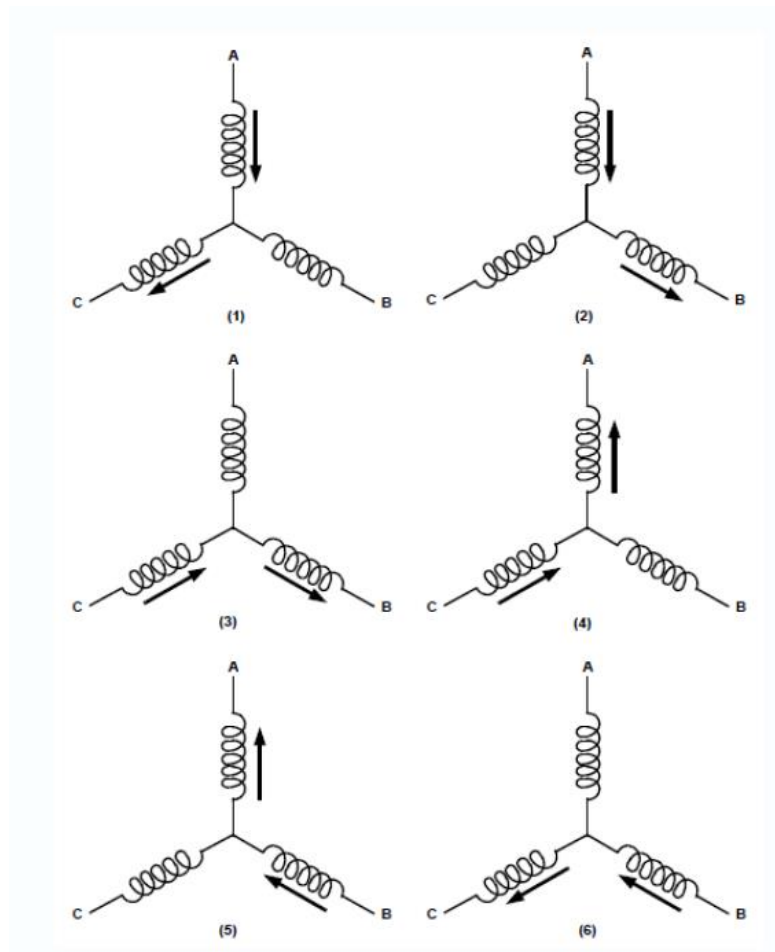


Рисунок 1.4 – Комутація обмоток

Таблиця 1 – Послідовність комутаційних фаз

№	Сигнали датчиків Холла		
	A	B	C
1	0	0	1
2	0	0	0
3	1	0	0
4	1	1	0
5	1	1	1
6	0	1	1

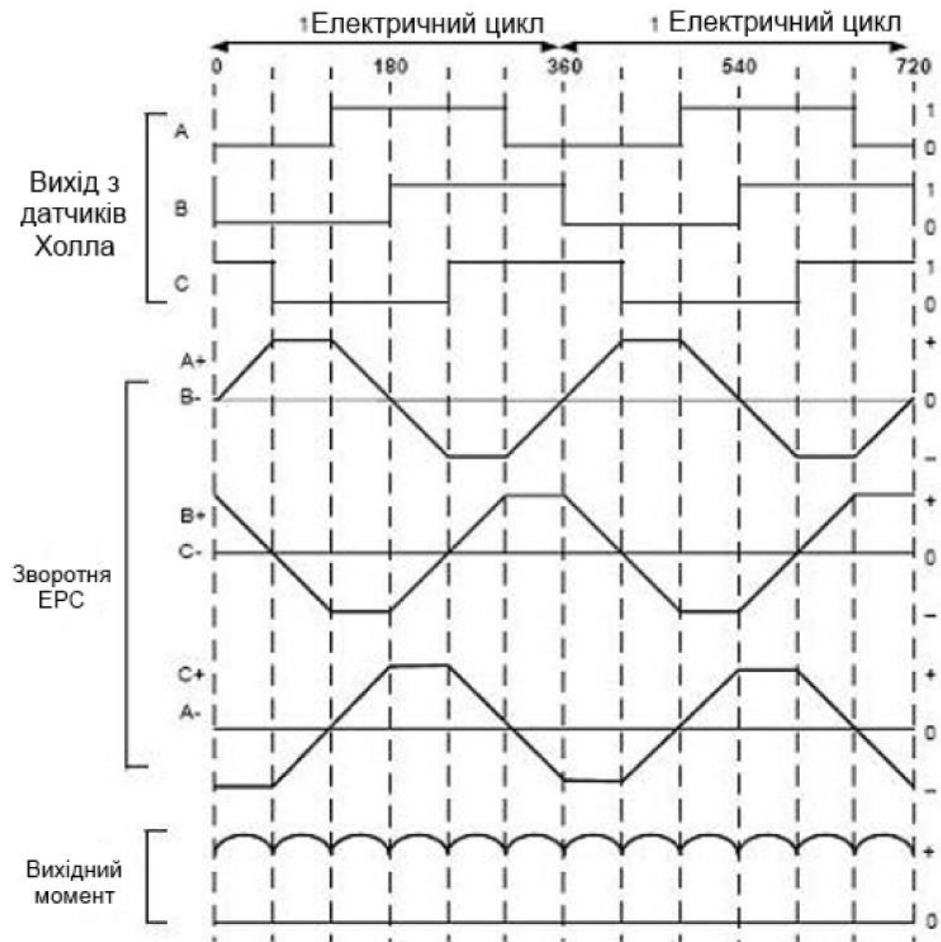


Рисунок 1.5 – Часові діаграми змін вихідних сигналів датчиків Холла

Часові діаграми змін вхідних сигналів датчиків Холла зображені на рисунку 1.5. Як видно з рисунку, вихідний момент сили (output torque), має пульсуючий характер.

Переваги трапецієподібного методу керування з датчиками Холла – проста схема керування. Недоліки такого методу – потрібні безпосередньо самі датчики, при роботі такої системи вихідний момент має пульсуючий характер.

1.4.2 Метод послаблення поля

Цей алгоритм полягає в цілеспрямованому збільшенні струму по поздовжній осі I_d електричного двигуна. ЕРС самоіндукції спрямована проти ЕРС обертання електричного двигуна (рис.1.6). В результаті сумарна ЕРС

електричної машини знижується, і з'являється можливість збільшення швидкості обертання ротора. При такому способі регулювання повний струм електричної машини не повинен перевищувати номінальний рівень. Це призводить до того, що з ростом струму I_d доводиться знижувати струм I_q , тим самим знижуючи момент, що розвивається електричним двигуном (рис. 1.7). Ефективність даного методу управління залежить від співвідношення індуктивностей L_d і L_q і може істотно відрізнятись для різних реалізацій електричних двигунів. Найбільш доцільно застосовувати алгоритм ослаблення поля в машинах з постійними магнітами, встановленими всередині ротора, виконаного з магнітом 'якого матеріалу [6].

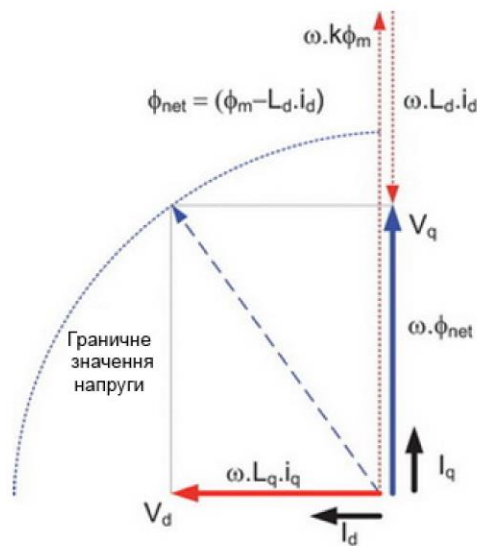


Рисунок 1.6 – Ослаблення магнітного поля

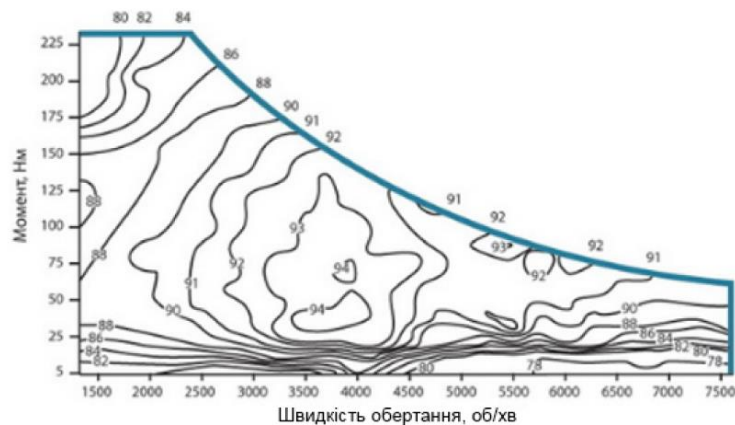


Рисунок 1.7 – Залежність моменту від швидкості обертання двигуна

1.4.3 Методи керування без датчиків.

Існують безколекторні двигуни без будь-яких датчиків положення. Без сенсорні методи керування використовують інформацію про струми і напруги двигуна для визначення положення ротора. Швидкість двигуна може бути отримана зі змін положення ротора, і ця інформація може використовуватися для керування швидкістю. Відсутність датчиків має ряд переваг, таких як більш низька вартість і економія місця, оскільки в кабелях, роз'ємах та чутливих електронних схемах немає необхідності.

Метод ЕРС з перетином нуля. Метод ЕРС з визначенням переходу через нуль використовує ЕРС в знеструмленій фазі під час комутації блоку. Перехід через нуль відбувається в середині інтервалу комутації (рис. 1.8).

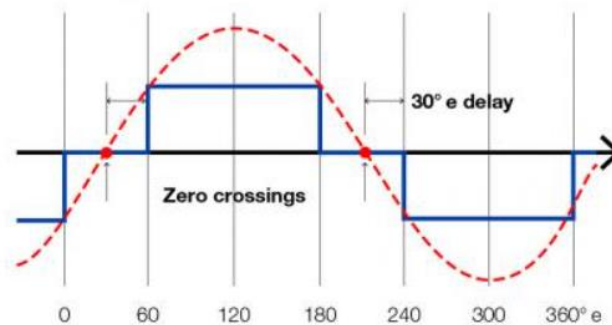


Рисунок 1.8 – Перехід через нуль

При такому алгоритмі комутації в кожен момент часу одна з фаз двигуна підключена до високого рівня живлення, друга - до низького, а третя фаза залишається вільною. Обертаючись, двигун наводить ЕРС у вільній обмотці. У міру обертання напруга на вільній фазі змінюється. Вимірюючи напругу на вільній фазі, можна визначити момент перемикання до наступного положенню ротора. Зазвичай визначають момент переходу напруги на вільній фазі через нульову точку (половину напруги живлення). Потрібно відстежити момент, коли напруга на вільній фазі зрівняється із середньою точкою. Час затримки до наступної точки комутації можна оцінити по попередніх етапах комутації.

Метод ЕРС з перетином нуля працює тільки при достатньо високій швидкості, тому що ЕРС стає нульовою в стані спокою. Запуск двигуна вимагає спеціального процесу, подібного управління кроковим двигуном, і його потрібно налаштовувати окремо. Безсенсорна комутація можлива тільки при оборотах близько 500-1000 об/хв або більше.

Метод ЕРС на основі спостерігача. Методи ЕРС на основі спостерігача використовують інформацію про струми двигуна для визначення положення і швидкості ротора. Такий підхід дає набагато вищу роздільну здатність положення ротора. Це забезпечує синусоїдальну комутацію з усіма її перевагами: більш висока ефективність, незначне виділення тепла, менша вібрація і шум. Метод ЕРС на основі спостерігача також вимагає для правильного функціонування мінімальної швидкості в пару сотень обертів за хвилину [7].

Недоліком таких методів проявляється в тому, що при низьких обертах ЕРС може виявитися недостатньою для чіткого визначення положення ротора

1.4.4 Скалярний метод керування

Скалярний метод керування – це метод керування безщітковим електродвигуном змінного струму, який полягає в тому, щоб підтримувати постійним відношення $\frac{\text{Напруга}}{\text{Частота}}$ у всьому робочому діапазоні швидкостей, при цьому контролюється тільки величина і частота напруги живлення [8].

Відношення $\frac{\text{Напруга}}{\text{Частота}}$ обчислюється на основі номінальних значень (напруги і частоти) контрольованого електродвигуна змінного струму. Підтримуючи постійним значення вищезгаданого відношення, з'являється можливість підтримувати відносно постійним магнітний потік в статорі двигуна. Якщо відношення збільшується тоді електродвигун входить в стан перезбудження і навпаки якщо відношення зменшується двигун знаходиться в стані спокою.

На низьких оборотах необхідно компенсувати падіння напруги на опорі статора, тому відношення $\frac{\text{Напруга}}{\text{Частота}}$ на низьких оборотах встановлюють вище, ніж номінальне значення. Скалярний метод управління найбільш широко використовується для керування асинхронними електродвигунами.

Скалярне керування електродвигунами змінного струму добре підходить для задач, де немає змінного навантаження і не потрібна хороша динаміка.

Переваги скалярного методу:

1. Проста реалізація.
2. Для роботи вищезгаданого методу не потрібен високопродуктивні математичні обчислювачі.
3. При реалізації методу не потрібні датчики положення ротору.

Недоліки скалярного методу:

1. Струми статора не контролюються напряму. Тобто, можливий вихід з ладу системи.
2. При реалізації даного методу не встановлюється датчик швидкості. Відповідно, швидкістю керувати змоги немає.
3. Не можна керувати моментом двигуна.

1.4.5 Векторне керування двигуном

Векторне керування — це метод керування безщітковими електродвигунами змінного струму, який дозволяє незалежно і практично без інерційно регулювати швидкість обертання і момент на валу електродвигуна.

Головна ідея векторного управління полягає в тому, щоб контролювати не тільки величину і частоту напруги живлення, але і фазу. Іншими словами контролюється величина і кут просторового вектора. Векторне керування в порівнянні зі скалярним володіє вищою продуктивністю. Векторне управління позбавляє практично від усіх недоліків скалярного управління [8].

Переваги векторного керування:

1. Висока точність регулювання швидкості.
2. Плавний старт і плавне обертання двигуна у всьому діапазоні частот.
3. Швидка реакція на зміну навантаження: при зміні навантаження практично не відбувається зміни швидкості.
4. Збільшений діапазон управління і точність регулювання.

Недоліки векторного керування:

1. Великі коливання швидкості при постійному навантаженні.
2. Велика обчислювальна складність.

1.5 Патентний пошук

Для пошуку вже існуючих рішень використовувались наступні слова: «керування електродвигуном», «трифазним», «методи керування».

ДП «Укрпатент»:

- 1) UA75173 «Пристрій керування трифазним асинхронним електродвигуном» [9].

Патент українського винахідника передбачає реалізацію керування електродвигуном за допомогою додавання додаткового мосту з ключів. Даний патент є покращенням іншої відомої моделі, яка не мала таких додаткових ключів перемикавання. Судячи з опису моделі, можна зробити висновок, що керування двигуном реалізовано на вже морально застарілих компонентах. На рисунку 1.9 зображена схема електрична принципова включення додаткових мостів.

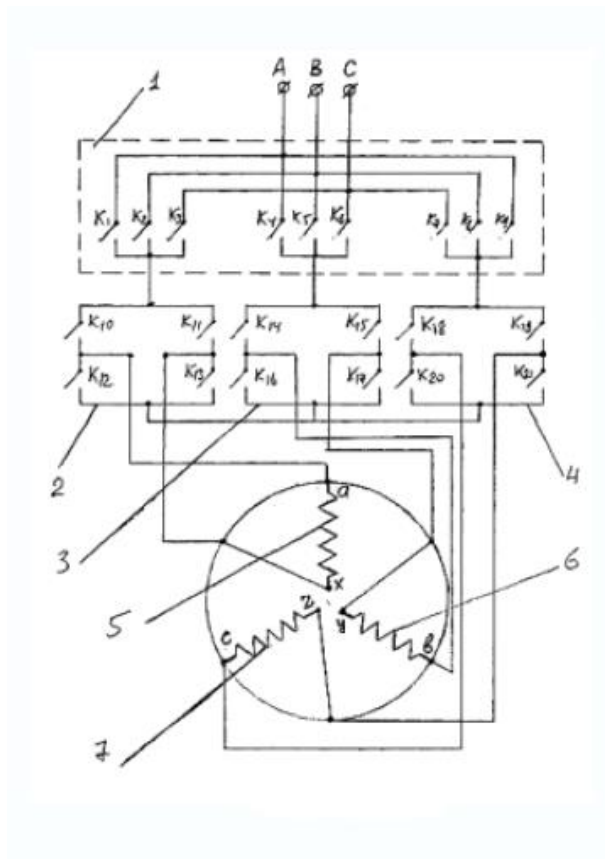


Рисунок 1.9 – Принципова схема патенту.

Вектор-діаграма вищезгаданого патенту наведено на рисунку 1.10

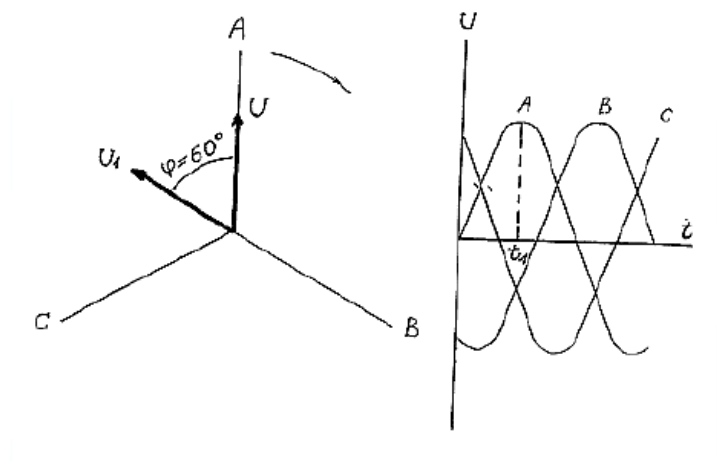


Рисунок 1.10 – Вектор-діаграма патенту.

2) UA84349 «Пристрій керування низьковольтним електродвигуном постійного струму середньої потужності».

В основу винаходу, поставлено задачу розробити пристрій для керування низьковольтним електродвигуном постійного струму середньої потужності, в якому шляхом введення нових вузлів та елементів забезпечити спрощення конструкції та підвищення коефіцієнту корисної дії.

Поставлена задача вирішена в пристрої за допомогою додання та реалізації наступних інженерних рішень: додання блоку живлення, блоку керування, блоку автоматичного гальмування та імпульсний датчик частоти обертання електродвигуна [10]. На рисунку 1.11 зображена принципова схема патенту.

Недоліком такої моделі можна вважати складність та застарілість в реалізації схемотехнічної частини. Також в даної моделі відсутній захист по перевищенню за струмом. В такому випадку, коли одне з плечей комутацій обмоток вийде з ладу, буде велика ймовірність того, що трапиться замикання і система стане не придатною до користування.

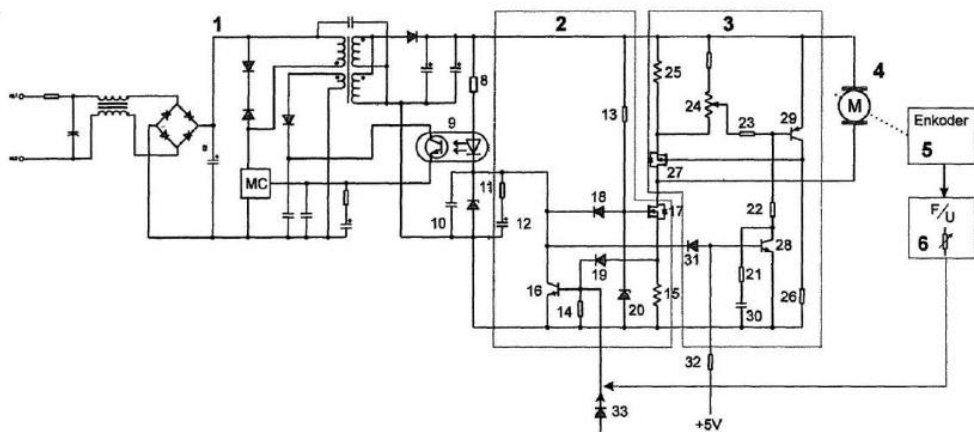


Рисунок 1.11 – Схема принципова патенту

1.6 Формування функціональної частини на основі проведеного аналізу.

Виходячи з отриманої та дослідженої інформації з попередніх пунктів цього оглядового розділу, можна сформувати метод та функціональну частину корисної моделі, що буде керувати двигуном і платформою в цілому.

Метою є покращення вже існуючого методу керування електродвигуном, шляхом додання до цього методу нового функціоналу. Який в свою чергу, може бути реалізований схемотехнічно з використанням новітніх комплектуючих. Також, проаналізувавши попередні патенти можна зробити висновок, що апаратна частина в тих рішення є застарілою і потребує певних оновлень.

З урахуванням заміни електронних компонентів можна прийти до висновку, що сам електронний блок матиме менші габаритні розміри, але при цьому обчислювальна здатність зросте. При заміні нових електронних компонентів важливо також відзначити, що надійність системи в цілому також зросте. Адже для організації керування електродвигуна постійного струму, можна використовувати одну спеціалізовану мікросхему. Відповідно, великий блок електронних компонентів замінюється одним елементом. З математичної точки зору, якщо буде один елемент, надійність такої системи буде більшою, ніж у тому випадку, якщо компонентів буде декілька десятків. Важливо врахувати, що при заміні компонентів спроститься конструкція пристрою.

В наведених вище корисних моделях немає реалізації захисту за струмом, такий критерій є критичним в реалізації подібних систем. Подібно до цього, повинно бути присутнє рішення, яке б дозволило захистити систему шляхом обмеження максимального значення струму.

Наразі існує багато різних методів для керування електродвигунами. Кожен з них має свої, як переваги над іншими, так і недоліки. Для подальшого дослідження обрано трапецієподібний метод. Він є простим в реалізації, що робить його поширеним у використанні. Але в нього також є і суттєві недоліки,

на які потрібно звернути увагу. До таких проблем можна віднести відсутність обмеження струму та вихідний крутний момент, що має пульсуючий характер.

З урахуванням стрімкого розвитку електротранспорту, можна зробити висновок, що дослідження та оптимізації методів керування електродвигунами є вельми актуальною темою.

Зробивши підсумок можна створити наступні задачі:

1. Використання трапецієподібного методу для подальшої оптимізації
2. Забезпечити обмеження струму.
3. Зменшення пульсацій у вихідному крутному моменті

Висновок до розділу:

Завдяки здешевленню магнітних матеріалів в парі з прискореним розвитком апаратних засобів систем керування і пристроїв силових електроніки, а саме IGBT-транзисторів, з'являється фактор, що дозволяє розробляти системи з використанням безколекторного двигуна постійного струму в тих галузях, де вони зазвичай не використовувались. Наразі електродвигуни поступово захоплюють сучасний ринок, тому є доцільним розвивати дану сферу електроніки.

Проведений аналіз існуючих методів керування електродвигунами постійного струму. Таке дослідження показало, які з методів використовувати доцільніше і, відповідно, покращувати. Розглянуто, що векторний метод має високі показники регулювання швидкості, збільшений діапазон управління та точність регулювання, але в свою чергу вимагає великих математичних обчислень. В свою чергу трапецієподібний метод реалізується набагато простіше з точки зору математики, але в той же час поступається деякими характеристиками векторному методу. Проте з додаванням нових електронних компонентів зробить можливим суттєво покращити цей метод.

Проаналізувавши існуючі винаходи, можна прийти до висновку, що більшість таких систем мають недостатній функціонал та застарілі електронні компоненти. Це дає змогу зрозуміти в який бік потрібно рухатись, щоб досягти кращого результату, ніж ті, що вже існують.

У розділі сформовано функціональну частину за допомогою проведеного аналізу ринку. Основними тезами формування функціональної частини – це підвищення продуктивності та надійності системи.

РОЗДІЛ 2. ОПТИМІЗАЦІЯ ТА ПІДВИЩЕННЯ НАДІЙНОСТІ МЕТОДУ КЕРУВАННЯ

2.1 Дослідження трапецієподібного методу керування.

Як визначалось в попередньому розділі, наразі відбувається стрімкий і потужний розвиток електротранспорту. З'являється все більше і більше нових видів транспортних засобів, які користуються великою популярністю серед молоді. Тому прийняте рішення обрати поширений та простий метод керування – трапецієподібний й оптимізувати його шляхом підвищення надійності та стабільності.

При виборі методу керування потрібно врахувати низку параметрів. Для початку потрібно мати на увазі, що повинно бути в результаті. Це може бути, як простий обертальний рух тільки за чи проти часовою стрілкою, так і складне керування, що включає в себе оберт на конкретний кут повороту із заданою швидкістю та поправкою на природні умови.

В попередньому розділі поставлені наступні задачі:

1. Використання трапецієподібного методу для подальшої оптимізації.
2. Забезпечити обмеження струму.
3. Зменшення пульсацій у вихідному крутному моменті.

Обраний трапецієподібний метод керування з датчиком положення. Таким чином, вже при виборі методу відсіється низка «проблем». До таких недоліків відноситься скалярне керування і його неможливість контролю струмів статора напряму. Саме це може послугувати можливістю втрати керування. Або метод керування моментом напряму, в цьому методі є великий недолік – високі пульсації моменту та струму.

В свою чергу трапецієподібний метод є одним з простих у реалізації, це робить його недорогим в реалізації, і найбільш поширеним. Але при цьому він також має свої проблеми.

Основні деталі системи показані на рисунку 2.1, який складається з трифазних підключених по схемі «зірка» обмоток статора та ротора з постійним магнітом. Двигун приводиться в дію трифазним інвертором тригерними сигналами, що генеруються контролером. Це залежить від датчиків положення ротора, підключених до перемикачів від T1 до T6, щоб приводити в рух двигун струмами статора.

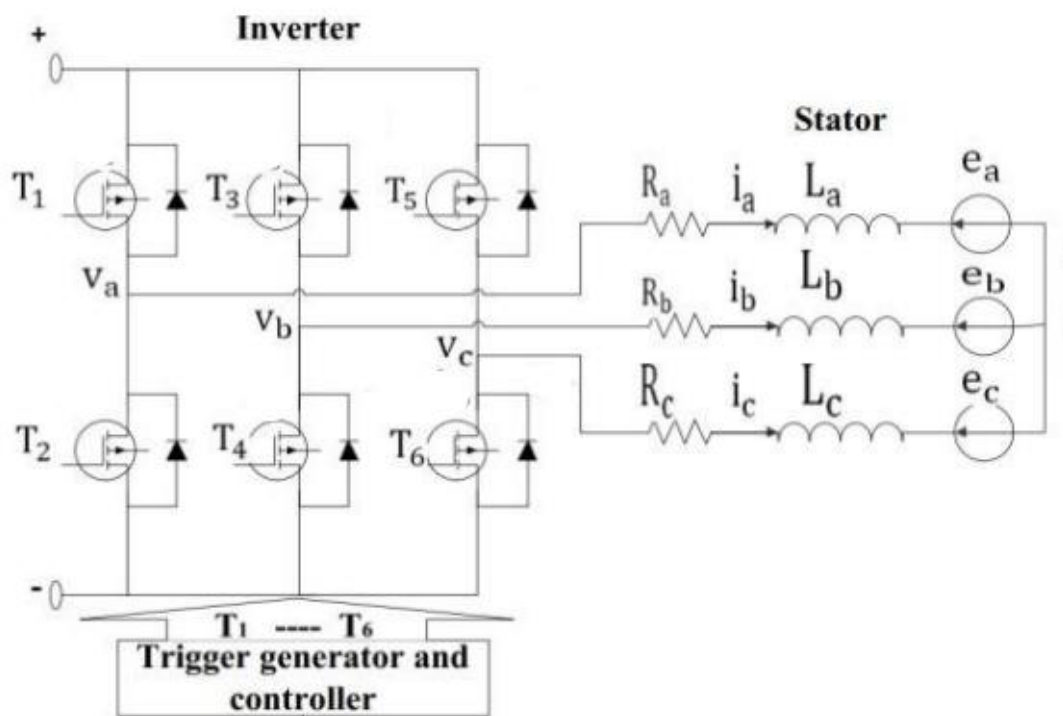


Рисунок 2.1 – Принципова схема керування

На рисунку 2.2 зображена еквівалентна схема принципова схема трифазних напруг статора в двигуні постійного струму. На даному рисунку враховується не тільки опір кожної котушки, а й магнітне поле.

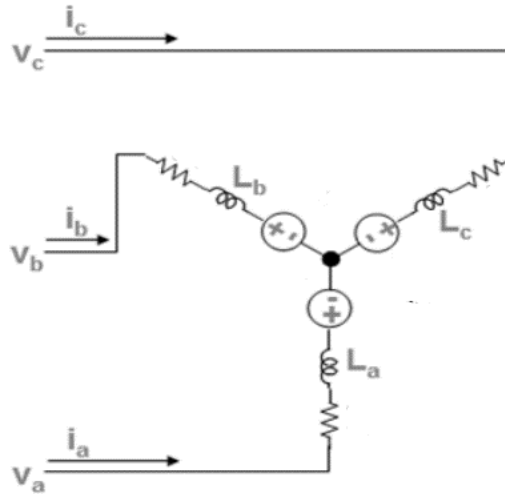


Рисунок 2.2 – Еквівалентна принципова схема

Фазові напруги в статорі двигуна описуються наступними рівняннями

(1):

$$\begin{aligned}
 V_a &= R_a i_a + L_a \frac{di_a}{dt} + M_{ab} \frac{di_b}{dt} + M_{ac} \frac{di_c}{dt} + e_a \\
 V_b &= R_b i_b + L_b \frac{di_b}{dt} + M_{ba} \frac{di_a}{dt} + M_{bc} \frac{di_c}{dt} + e_b \\
 V_c &= R_c i_c + L_c \frac{di_c}{dt} + M_{cb} \frac{di_b}{dt} + M_{ca} \frac{di_a}{dt} + e_c
 \end{aligned} \tag{1}$$

Якщо припустити, що така трифазна система збалансована, то опір, індуктивність та магнітне поле – однакові.

$$\begin{aligned}
 R_a &= R_b = R_c = R, L_a = L_b = L_c = L, \\
 M_{ab} &= M_{ba} = M_{bc} = M_{cb} = M_{ac} = M_{ca} = M
 \end{aligned}$$

В такому випадку рівняння (1) прийме вигляд (2):

$$\begin{aligned}
 V_a &= R i_a + (L - M) \frac{di_a}{dt} + e_a \\
 V_b &= R i_b + (L - M) \frac{di_b}{dt} + e_b \\
 V_c &= R i_c + (L - M) \frac{di_c}{dt} + e_c
 \end{aligned} \tag{2}$$

В рівнянні (2) можна знехтувати магнітною індуктивністю, оскільки можна прийняти, що вона однакова. Тоді рівняння (2) можна записати наступним чином (3):

$$V_a = R i_a + L \frac{di_a}{dt} + e_a$$

$$V_b = Ri_b + L \frac{di_b}{dt} + e_b \quad (3)$$

$$V_c = Ri_c + L \frac{di_c}{dt} + e_c$$

Електромагнітний момент (torque) визначається як (4):

$$T_e = \frac{e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c}{\omega_r} \quad (4)$$

Електромагнітний крутний момент дорівнює (5):

$$T_e = B_m \omega_r + J_m \frac{d}{dt} \omega_r + T_L \quad (5),$$

де T_L – крутний момент навантаження (load torque), J_m – інерція ротора, B – постійна тертя.

Трапецієподібна або шестиступінчата (six-state) комутація поширена в високошвидкісних виробках або коли потрібно більш високий пусковий момент. Трапецієподібна комутація також менш затратна, ніж інші методи, завдяки простим алгоритмам управління, що робить її найбільш розповсюдженою (рис. 2.3).

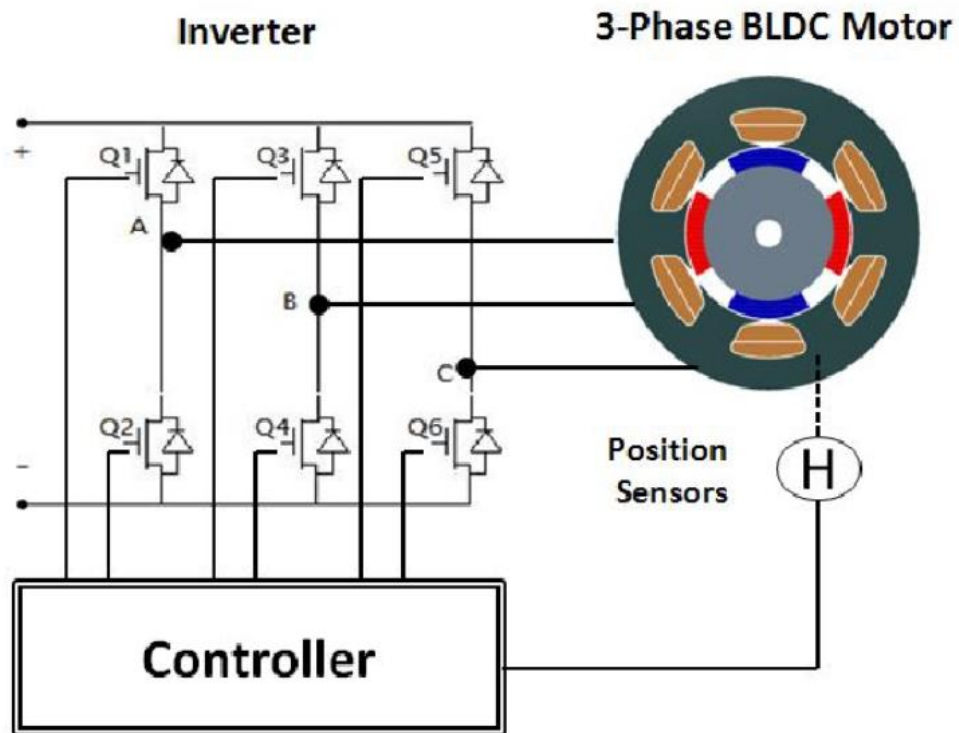


Рисунок 2.3 – Типова схема для трапецієподібного керування

У більшості випадків положення ротора визначається трьома датчиками Холла, встановленими на статорі на відстані 120 (електричних) градусів один від одного. Коли ротор проходить над датчиками, вони подають високий або низький сигнал, щоб вказати, який полюс ротора (N або S) проходить. Перехід від високого до низького (або від низького до високого) трьох датчиків Холла дає інформацію про стан ротора кожні 60 градусів, це означає, що для завершення одного електричного циклу необхідно шість кроків - звідси і термін «шестиступінчата комутація» (рис. 2.4).

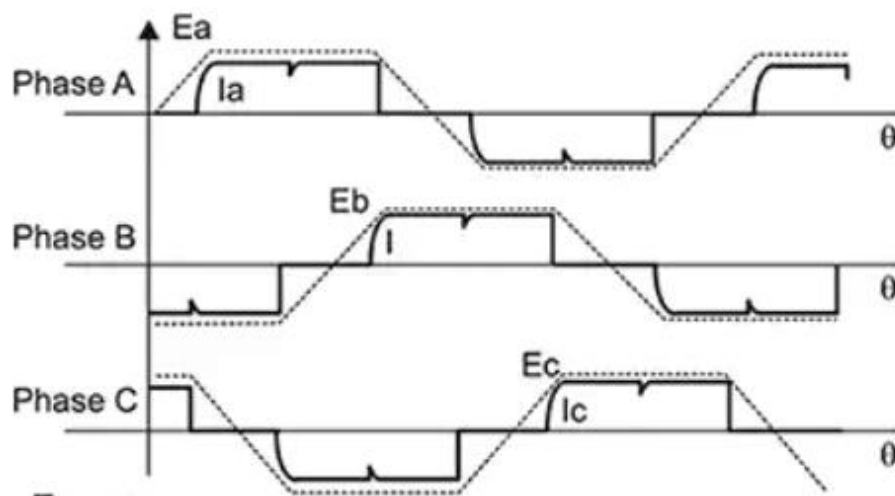


Рисунок 2.4 – Інформація з датчиків Холла

Правильна послідовність комутації визначається комбінацією сигналів датчика Холла. Трапецієподібна комутація може також бути організована на основі зворотної ЕРС двигуна, що дозволяє виключити датчики Холла. У типовому трифазному двигуні BLDC з трапецієподібним керуванням одна обмотка позитивна, одна негативна і одна розімкнута (не підключена). Відкрита обмотка може використовуватися для виявлення точки перетину нуля зворотного ЕРС, що відповідає зміні сигналу в датчику Холла. Однак зворотна ЕРС пропорційна швидкості двигуна. Це означає, що на дуже низьких швидкостях (і особливо при запуску) зворотна ЕРС буде дуже низькою, тому двигун необхідно запускати в режимі розімкнутого контуру до тих пір, поки не буде згенеровано достатня швидкість і зворотна ЕРС. У цей

момент контролер можна переключити на визначення зворотної ЕРС для комутації.

Трапецієподібне управління застосовується для управління синхронними двигунами з постійними магнітами з трапецієподібною зворотною ЕРС. При цьому цей метод дозволяє також керувати синхронними двигунами з постійними магнітами з синусоїдальною зворотною ЕРС, але тоді середній момент електроприводу буде нижчим, а пульсації моменту складуться частину від максимального значення.

Існує трапецієподібне управління без зворотного зв'язку і зі зворотним зв'язком по положенню ротора. Але в такому рішенні управління без зворотного зв'язку не оптимальне і може привести до виходу СДПМ з синхронізму, тобто до втрати керованості [11].

Керування із зворотнім зв'язком можна поділити на дві частини:

1. Трапецієподібне керування за датчиком положення – Датчики Холла
2. Трапецієподібне керування без датчиків положення.

Датчики Холла дозволяють визначити кут з точністю ± 30 градусів. При такому управлінні вектор струму статора приймає тільки шість положень на один електричний період, в результаті чого на виході з'являються пульсації моменту. Перший недолік при реалізації – вихідний крутний момент має пульсуючий характер (рис. 2.5).

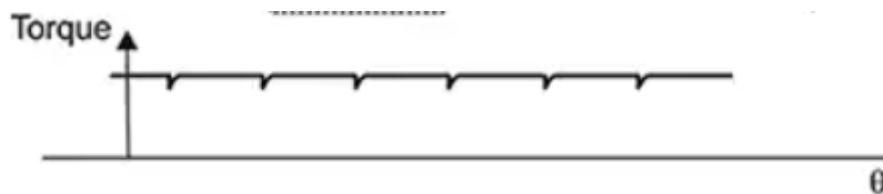


Рисунок 2.5 – Вихідний крутний момент

Також, одним з недоліків даного методу є те, що при його реалізації не враховується контроль за струмом. Через такий суттєвий недолік система може вийти повністю з ладу. Тому, щоб покращити метод керування потрібно

спроєктувати систему контролю за струмом. За допомогою такого блоку з'явиться можливість обмежувати значення струму, що проходить через статор.

2.2 Оптимізація за допомогою ПІ-регулятора.

Будь-який ПІД-регулятор можна розділити на 3 складові, кожна з яких має своє призначення та опис.

Перша складова – це пропорційна частина, яка представляє собою помилку, помножену на постійний коефіцієнт посилення, який дорівнює КР. Параметрами Р-регулятора є коефіцієнт посилення K_P і робоча точка Y_0 [12]. Робоча точка Y_0 визначається як вихідне значення, при якому відхилення керування дорівнює нулю. Пропорційну складову можна описати наступним рівнянням (2):

$$u(t) = K_P e(t), \quad (2)$$

де $u(t)$ – функція, K_P – пропорційний коефіцієнт, $e(t)$ – поточна помилка. Принцип дії полягає в тому, що регулятор генерує керуючу дію на об'єкт пропорційно величині помилки (чим більша похибка, тим більша керуюча дія).

Друга частина – інтегральна частина, яка представляє собою інтегрування помилки з часом, помножене на постійний коефіцієнт посилення, який дорівнює КІ. Керуючий сигнал пропорційний інтегралу від помилки. Інтегральну складову можна описати рівнянням (3):

$$u(t) = K_i \int_0^t e(t) dt, \quad (3)$$

де $u(t)$ – функція, K_i – інтегральний коефіцієнт, $e(t)$ – поточна помилка. Інтегральна складова збільшує взаємодію стосовно не лише помилки, але й часу, протягом якого вона зберігається. Отже, якщо прикладеної сили недостатньо для зведення похибки до нуля, ця сила буде збільшуватися з плином часу.

Третя частина – це диференційна частина, яка представляє собою похідну помилки по часу, помножену на постійний коефіцієнт посилення,

рівний K_D . Диференційна складова враховує не помилку, а швидкість зміни помилки, намагаючись довести цю швидкість до нуля. Він спрямований на вирівнювання траєкторії помилок у горизонтальну лінію, зменшення прикладеної сили, і таким чином зменшує перерегулювання [13]. Диференційну складову можна описати наступним чином (4):

$$u(t) = K_d \frac{de(t)}{dt}, \quad (4)$$

де K_d – диференційний коефіцієнт

Як невеликий підсумок можна сказати, що пропорційна частина зменшує реакції системи на помилки, інтегральна частина усуває помилку, і нарешті похідна частина гасить динамічну реакцію та покращує стабільність системи.

Керування швидкістю – це зміна електричних параметрів, які подаються на двигун, для досягнення швидкості, що необхідна. Іншою метою керування швидкістю – це змога підтримувати постійну швидкість двигуна із зовнішнім впливом на крутний момент. Існує два основні методи управління швидкістю: пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор і нечіткий ПІ-регулятор [14]. У разі керування швидкістю двигуна використання диференційної складової збільшує вплив шуму, тому в більшості випадків не використовується. В даному випадку приймемо коефіцієнт K_d рівним нулю, і буде використовуватися ПІ-регулятор.

Метою будь-якого контролера – мінімізувати помилку між фактичним виходом, який необхідно контролювати, і бажаним виходом. У разі регулювання швидкості обертання ця помилка може бути описана наступним рівнянням (5) [15]:

$$e(t) = \omega_{SP}(t) - \omega_{PV}(t) \quad (5)$$

де $e(t)$ – функція помилки від часу, $\omega_{SP}(t)$ – це опорна швидкість або задане значення швидкості як функція часу, а $\omega_{PV}(t)$ – фактична швидкість двигуна як функція часу.

Термін ПІ означає пропорційно-інтегральний регулятор. Рівняння ПІ-регулятора можна виразити таким чином (6).

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt, \quad (6)$$

Де $u(t)$ - вихідний сигнал ПІ, K_p – пропорційний коефіцієнт, K_i - інтегральний, а $e(t)$ – функція помилок. Блок-діаграму ПІ-регулятора зображено на рисунку 2.6

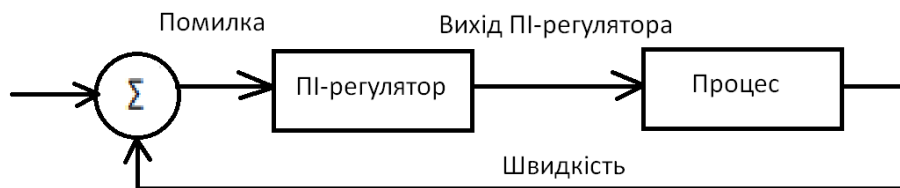


Рисунок 2.6 – Блок-діаграма ПІ-регулятора

Згідно [16], є чотири основні параметри, які повинна мінімізувати система управління:

1. Час наростання (T_r): визначається як час, необхідний для переходу від 10% до 90% цільового значення.

2. Час встановлення (T_s): визначається як час, необхідний для того, щоб крива відгуку досягла діапазону і залишалася в межах за визначений відсоток (зазвичай 5% або 2%) від остаточного значення [17].

3. Помилка стійкого стану: визначається як різниця між виходом в стійкому стані і бажаним виходом.

4. Перерегулювання: визначається як максимальне пікове значення кривої відгуку, виміряній на основі бажаного відгуку системи [18]. Перерегулювання - це максимальне значення на кривій відгуку мінус цільове значення, поділене на цільове значення, і може бути розрахована, як показано на рівнянні.

Для створення більш ідеальної системи потрібно враховувати й інші параметри, такі як струм у момент старту та крутний момент у момент старт. Таким чином, будь-який контролер, ПІ-регулятор або нечіткий ПІ-регулятор,

прагне скоротити час наростання, час встановлення, стійку помилку та перерегулювання.

2.3 Використання гістерезисного керування струмом

Широтно-імпульсна модуляція та гістерезисне керування струмом – два поширених методи, що використовуються для управління перетворювачами потужності. ШІМ має перевагу фіксованої частоти перемикавання, що полегшує конструкцію вихідного фільтра. Недоліком ШІМ є те, що контролер, як правило, налаштований, і існує компроміс між динамічними характеристиками в широкому робочому діапазоні та робочими характеристиками в конкретній робочій точці [19]. З іншого боку, гістерезисне керування струмом має переваги надійного керування, а саме: забезпечення стабільності, швидка динамічна реакція при зміні параметрів навантаження та забезпечує більшу пропускну здатність керування [20]. Ці переваги походять від того, що регулювання струму гістерезису є формою регулювання ковзного (рос. скользящий) режиму [21]. Ковзний режим – вид руху динамічної системи, коли її права частина розривна і точка «ковзає» по кривій розриву. На практиці ковзний режим найчастіше трапляється, коли налагоджено автоматичне керування з дискретним виходом. Найпростіша задача керування – підтримка температури в кімнаті включенням-виключенням обігрівача. Працює на змінному режимі, і в ідеальних умовах обігрівач буде включатися-вимикатися з високою частотою [22]. Прості апаратні реалізації можливі з використанням аналогових компараторів, а в певних топологіях гістерезисне керування може забезпечити автоматичний захист від перевантаження. З цих причин такий метод широко застосовується в перетворювачах постійного струму, приводах двигунів, системах розподілу, керуванні рухом, фільтрах, інверторах, ДБЖ, енергопостачання та зарядні пристрої для акумуляторів.

У гістерезисному керуванні існує дві межі перемикання, висока та низька. Ці дві межі визначаються через єдину змінну стану [23]. Дві межі з невеликою смугою контролюють дії вмикання та вимикання ключів. Гістерезисне керування струмом для перетворювача зображено на рисунку 2.7.

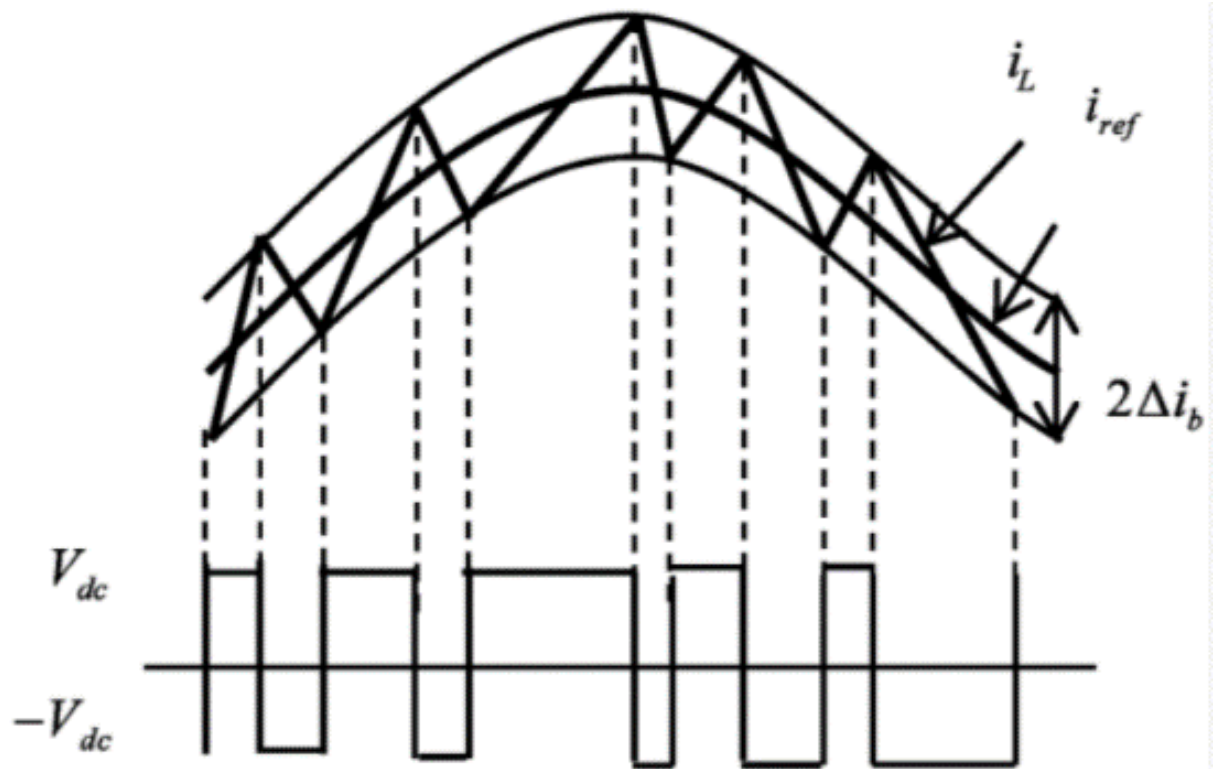


Рисунок 2.7 – Графічне зображення гістерезисного керування

На рисунку 2.7 видно, що в ролі опорного струму виступає i_{ref} , а смугою пропускання в даному випадку буде ширина $2\Delta i_b$. Гістерезисна ширина визначається як різниця між верхньою та нижньою границею значення струму.

У класичному гістерезисному керуванні струмом з фіксованою смугою, діапазон струму фіксується на певному значенні Δi_b [24]. Поки вихідний струм i_L знаходиться між верхнім і нижнім межами, перемикання не відбувається. Коли вихідний струм перетинає верхню межу діапазону гістерезису ($i_{ref} + \Delta i_b$), відповідний ключ вимикається, а інший навпаки вмикається, і струм починає спадати. В іншому випадку, якщо струм перетинає нижню межу діапазону

гістерезису ($i_{ref} - \Delta i_b$), перший ключ вмикається, а інший – вимикається, і струм починає збільшуватися (рисунок 2.7).

В аналоговій схемотехніці, на базі однофазного інвертора, це можна реалізувати наступним чином (рис. 2.8).

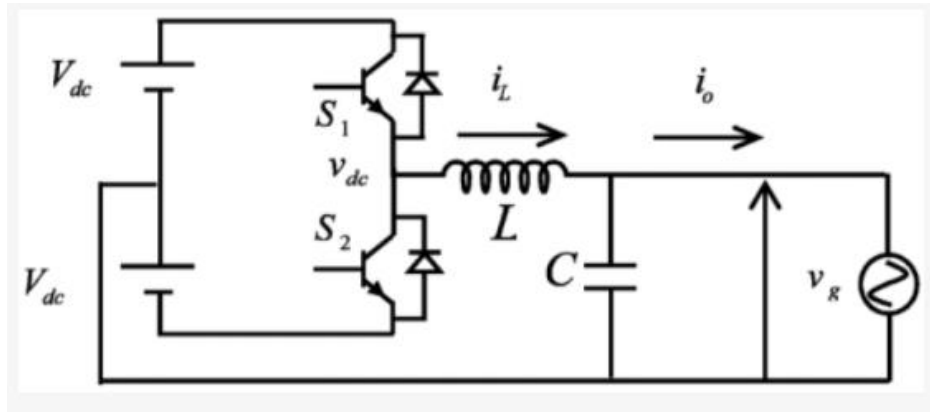


Рисунок 2.8 – Реалізація однофазного інвертора

Вихід підключений до напруги змінного струму V_g мережі, як на рисунку 2.8. Напруга подається від двох постійних та збалансованих джерел постійного струму, кожен з яких має значення V_{dc} . Вихідний струм інвертора i_L керується комутаційними ключами S_1 і S_2 для відстеження заданого опорного струму i_{ref} . Пульсації вихідного струму i_L відфільтровуються, і струм i_o виводиться без пульсацій.

Цифрова модель може бути представлена наступним чином (рис. 2.9).

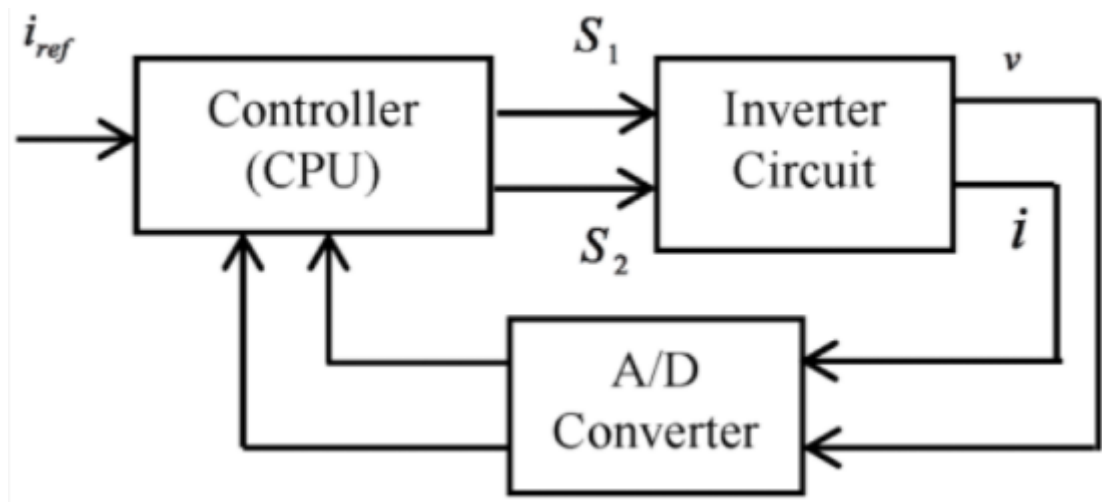


Рисунок 2.9 – Блок-схема цифрової реалізації ГКС

На рисунку 2.9 зображено структуру цифрової системи керування. Вихідні напруги та струми дискретизуються аналоговими або цифровими перетворювачами і використовуються для обчислення імпульсів увімкнення та вимкнення перемикачів S1 і S2.

Стани перемикачів, відповідні входи та виходи інвертора наведені в таблиці 2.1.

Таблиця 2.1 – Стани перемикачів

Напівперіод	S_1	S_2	Вхідна напруга v_{dc}	Вихідний струм i_L
Позитивний	On	Off	Vdc	Зростає
Негативний	Off	On	-Vdc	Спадає

Значення діапазону струму гістерезису прямо пропорційне пульсації струму і обернено пропорційне частоті комутації. Таким чином, збільшення значення смуги струму гістерезису збільшить пульсацію струму, тоді як зменшення смуги збільшить втрати від перемикання. В аналогових контролерах поточна пульсація завжди тримається точно в діапазоні гістерезису. Однак у цифрових контролерах гістерезисне керування буде ефективним лише в тому випадку, якщо діапазон струму обраний таким чином, що задовольняє наступній умові (7):

$$\Delta i_b > \max\left(\frac{di_{ref}}{dt}\right) \frac{1}{f_{sp}}, \quad (7)$$

де f_{sp} - частота дискретизації. Максимальна частота перемикання f_{sw_max} повинна бути менше половини частоти дискретизації f_{sp} , тобто (8):

$$f_{sw_max} \leq \frac{1}{2} f_{sp} \quad (8)$$

Гістерезисне керування струмом не має таких недоліків, як затримки під час використання ШІМ керування. Гістерезисне керування струмом має швидкий динамічний відгук і не вимагає будь-якої інформації про параметри

системи, що підвищує його надійність. З цієї причини він знаходить застосування у великій кількості інверторів, де потрібне перемикання з одного стану в інший. Базова реалізація гістерезисного контролю на основі сигналу комутації, який є похідним шляхом порівняння фактичного струму і опорного струму, так що поточна помилка зберігаються в межах заданого діапазону допуску. У класичних гістерезисних регуляторах струму, гістерезисна смуга зазвичай фіксується на певному значенні, що змушує частоту перемикання змінюватися для стримування пульсацій струму в межах діапазону. Це призводить до небажаних сильних перешкод між фазами в трифазній системі [25]. Щоб вирішити цю проблему, існує методика адаптивного гістерезисного управління струмом, яка використовується в багатьох додатках. У цій методиці смуга гістерезисного струму не є фіксованою, а регулюється адаптивно в кожному періоді модуляції перемикання і на основі вимірних значень вихідної напруги та бажаної постійної частоти перемикання [26]. Цифрове гістерезисне керування струмом зазвичай вимагає досить високої частоти дискретизації для управління пристроями з точним часом перемикання. Струм пульсацій змінюється під час кожної комутаційної модуляції з дуже високою швидкістю, яка обернено пропорційна вихідній індуктивності і пропорційна різниці між постійною напругою і вихідними напругами. Оскільки під час інтервалу дискретизації смуга гістерезисного струму не могла спостерігатися до прибуття наступної вибірки даних. Низька частота дискретизації може привести до значного збільшення пульсацій струму.

Висновок до розділу

В даному розділі більш детально розглянутий трапецієподібний метод керування. В результаті можна сказати, що сам по собі метод простий в реалізації і для його втілення не потрібно багато ресурсів. Виходячи з останніх двох умов, наразі трапецієподібний метод є дуже поширеним у використанні. Також до його переваг можна віднести що для його реалізації не потрібно

використовувати багато математичних обчислень та великої кількості додаткової електроніки.

Одна попри вищесказані переваги, в цьому методі існують і свої недоліки. Одним з таких недоліків є вихідний крутний момент, а саме його форма. На виході він має пульсуючий характер. Також до недоліків можна віднести і те, що метод не передбачає регулювання швидкості обертання двигуна. Однак до недоліків відноситься й те, що метод ніяким чином не передбачає обмеження за струмом.

В даному розділі запропоновано вирішення вищезгаданих недоліків, а саме, додавання нової обв'язки для забезпечення керування швидкістю та забезпечення кращої стабільності роботи двигуна, а також обмеження й утримування струму в потрібному діапазоні значень.

Для того, щоб система працювала більш стабільно і не вийшла з ладу при зміні навантаження на двигун, запропоновано додати до базового методу керування використання пропорційно-інтегрального регулятора. Третя складова ПІД-регулятора – диференційна не використовуються. Оскільки вона може наводити шуми в сигнали. Тому прийнято рішення прирівняти коефіцієнт K_d до нуля. Таким чином, завдяки рішення додати ПІ-регулятор, метод збільшить свої переваги і у системи в цілому з'явиться можливість більш адаптивно реагувати на зовнішні зміни.

Другим покращенням стало використання гістерезисного керування струмом. Оскільки гістерезисний метод керування має такі переваги як: швидке реагування на зміни живлення та навантаження, з'являється автоматичний захист від перевантаження за струмом, а також з'являється вибір потрібного діапазону значень струмів.

Підводячи підсумок, в даному розділі запропоновані рішення, які при реалізації зможуть покращити метод, шляхом підвищення продуктивності та надійності.

РОЗДІЛ 3. ВИКОРИСТАННЯ MATLAB ДЛЯ СИМУЛЯЦІЇ SIMULINK-МОДЕЛІ

Цей розділ поділено на три частини. Перша частина – створення й симуляція методу без обв’язки. Друга частина – з додаванням ПІ-регулятора, третя частина – додавання гістерезисного керування струмом.

3.1 Створення та симуляція Simulink-моделі BLDC-двигуна в Matlab.

Для початку додано модель синхронної машини з постійними магнітами (рис. 3.1).

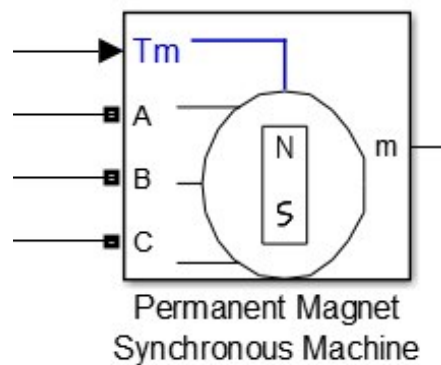


Рисунок 3.1 – PMSM

Кількість фаз – 3, зворотна форма ЕРС – трапецієподібна.

Відповідно, для керування двигуном і перемикання відповідних обмоток необхідні транзисторні ключі. На рисунку 3.2 обрано універсальний міст, а в якості самих ключів виступають IGBT-транзистори.

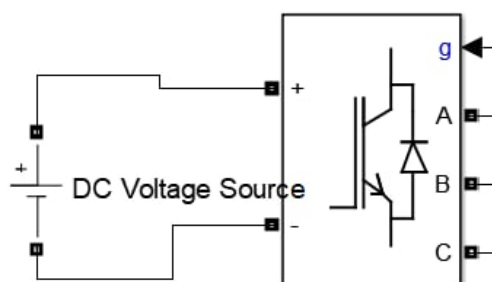


Рисунок 3.2 – Універсальний міст та джерело постійної напруги

Також важливо враховувати і опір відкритого каналу. Чим менший опір, тим краще.

Сигнали з датчиків Холла потрібно декодувати. Для цього необхідно створити блок, який буде оброблювати сигнали з датчиків.

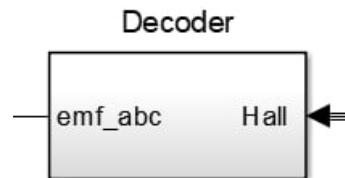


Рисунок 3.3 – Декодер сигналів датчиків Холла

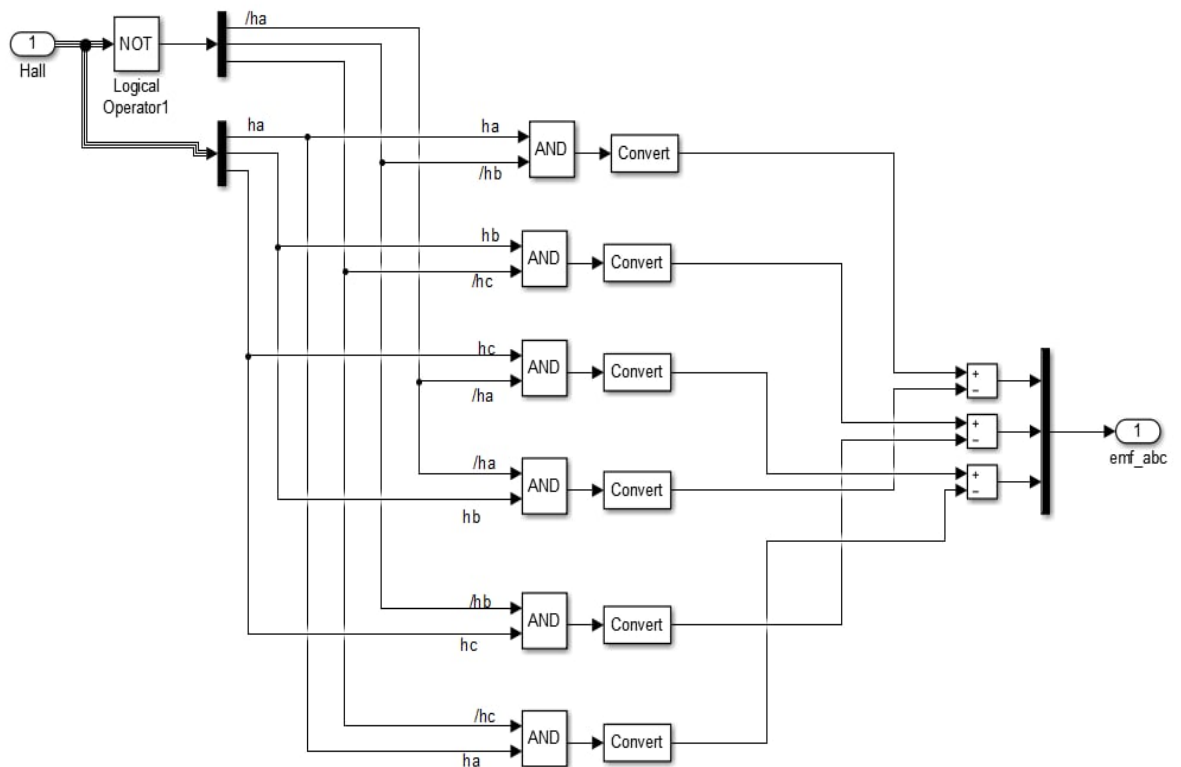


Рисунок 3.4 – Внутрішня будова декодера

На рисунку 3.3 та 3.4 зображено декодер сигналів з датчиків Холла. Таблиця істинності цих сигналів наведено у таблиці 3.1

Таблиця 3.1 – Таблиця істинності декодера

Датчик А	Датчик В	Датчик С	Фаза А	Фаза В	Фаза С
0	0	0	0	0	0
0	0	1	0	-1	+1
0	1	0	-1	+1	0
0	1	1	-1	0	+1
1	0	0	+1	0	-1
1	0	1	+1	-1	0
1	1	0	0	+1	-1
1	1	1	0	0	0

Далі створений блок, який приймає вихідні сигнали з декодера і передає їх на керування транзисторними ключами (рис. 3.5 та 3.6).

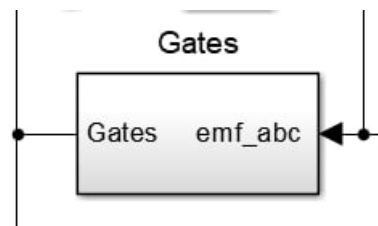


Рисунок 3.5 – Блок керування транзисторними ключами

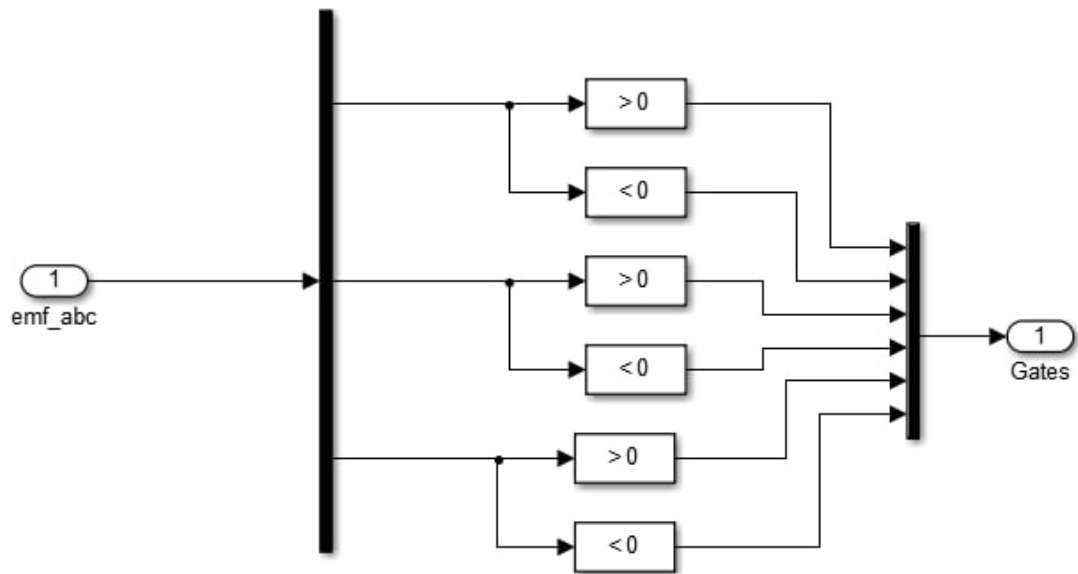


Рисунок 3.6 – Внутрішня будова блоку керування

В таблиці 3.2 наведено таблицю істинності блоку.

ΦА	ΦВ	ΦС	T1	T2	T3	T4	T5	T6
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	-1	+1	0	0	0	1	1	0
-1	+1	0	0	1	1	0	0	0
-1	0	+1	0	1	0	0	1	0
+1	0	-1	1	0	0	0	0	1
+1	-1	0	1	0	0	1	0	0
0	+1	-1	0	0	1	0	0	1
0	0	0	0	0	0	0	0	0

Загальна модель зображена на рисунку 3.7

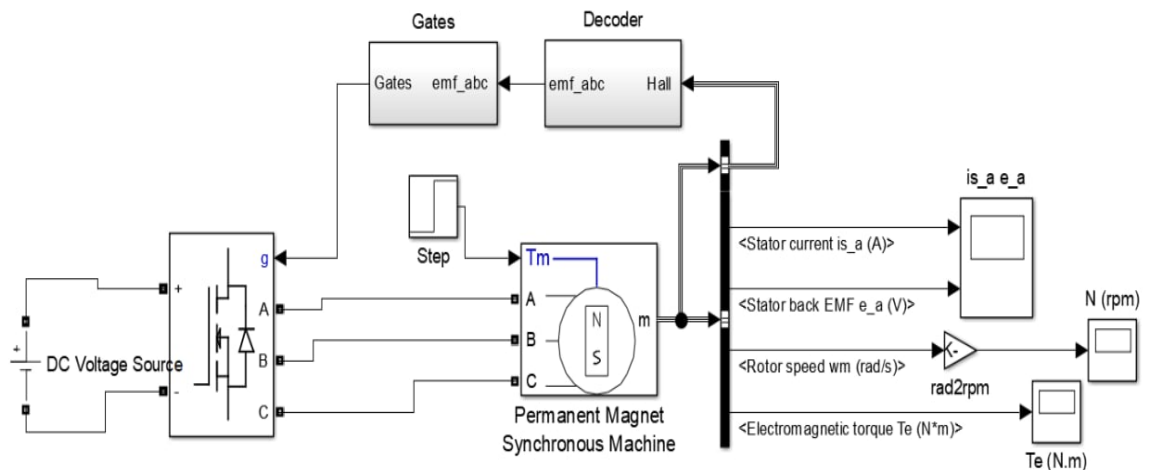


Рисунок 3.7 – Загальна модель

Скомпілювавши і просимулювавши модель отримані наступні результати:

На рисунку 3.8 зображено струм статора. З результатів видно, що при старті обертання струм різко зростає, аналогічно і з іншими параметрами. Швидкість обертання (рис. 3.9) різко зростає, після чого встановлюється в робоче положення. В момент старту крутний момент (рис. 3.10) також різко зростає, після чого майже дорівнює нулю. Після спадання обертів, крутний

момент встановлюється в робоче положення. На останньому рисунку добре видно пульсації крутного моменту.

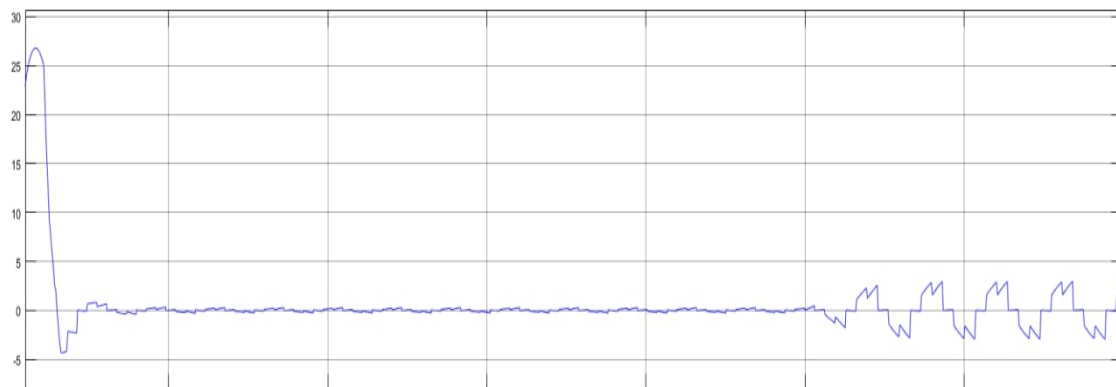


Рисунок 3.8 – Струм статора

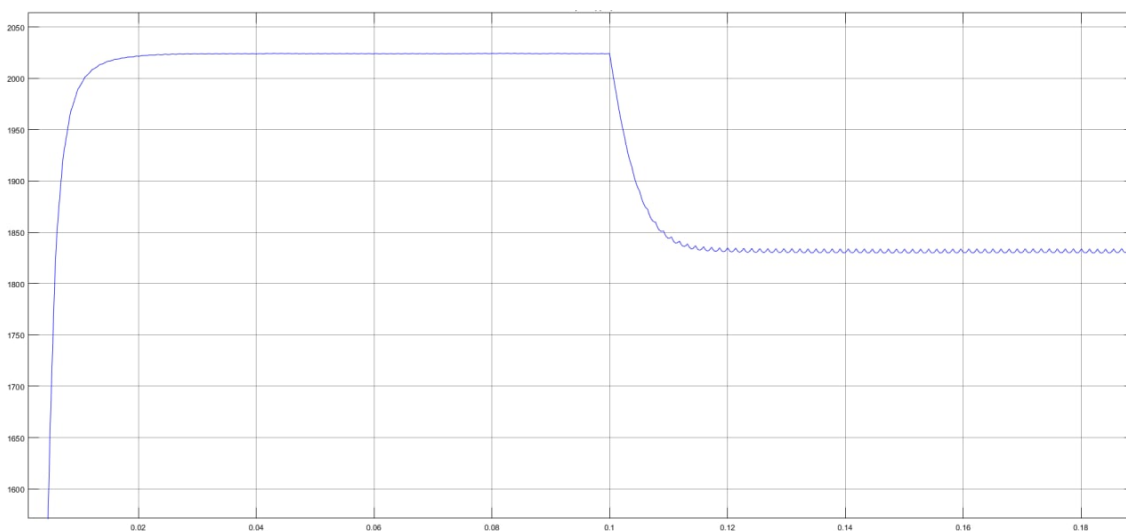


Рисунок 3.9 – Швидкість обертання двигуна

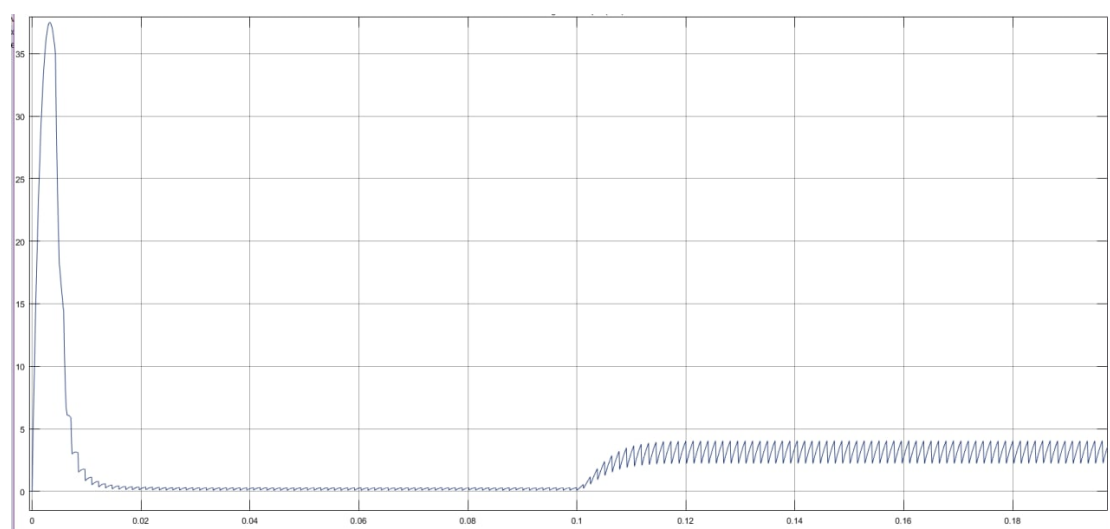


Рисунок 3.10 – Вихідний електромагнітний крутний момент

3.2 Симуляція Simulink-моделі з додаванням ПІ-регулятора

На даному етапі створена Simulink-модель в якій реалізований ПІ-регулятор. На рисунку 3.11 зображена загальна Simulink-модель.

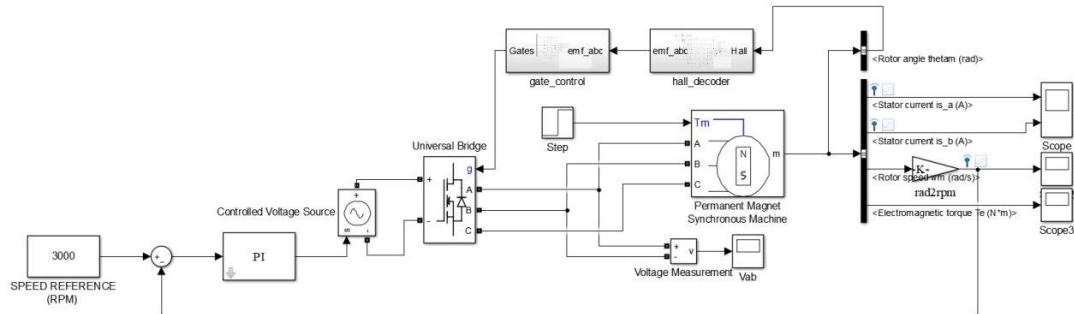


Рисунок 3.11 – Загальна Simulink-модель

Блок ПІ-регулятора реалізований наступним чином (рис. 3.12)

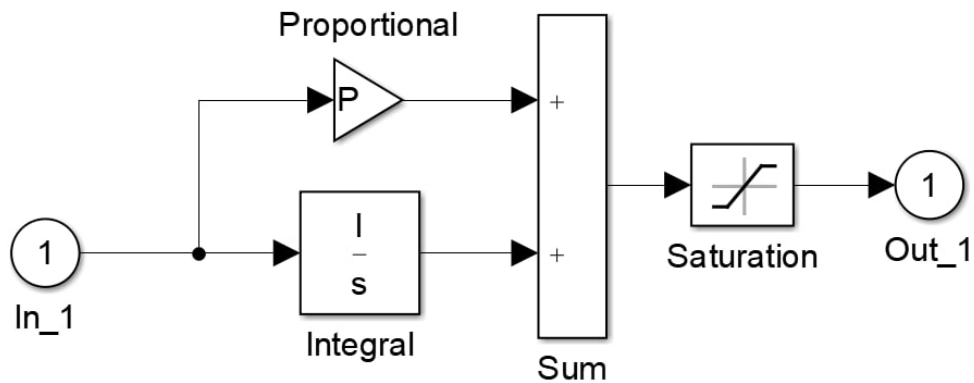


Рисунок 3.12 – ПІ-регулятор

Просимулювавши створену модель отримано наступні результати: На рисунку 3.13 видно, що в момент зміни навантаження, зворотна ЕРС зменшилась, а струм навпаки став більшим. Це зумовлено тим, що в цей момент часу, вихідний крутний момент (рис. 3.15) став більшим по значенню. З рисунків видно, що ПІ-регулятор працює і система реагує на зовнішні зміни. Таким чином, при зміні навантаження, швидкість обертання (рис. 3.14) дещо зменшиться, але з часом знову набере те ж значення, що і на початку. Також при старті видно, що крутний момент спочатку зростає, а потім намагається вирівнятись. Аналогічно зі швидкістю обертання.

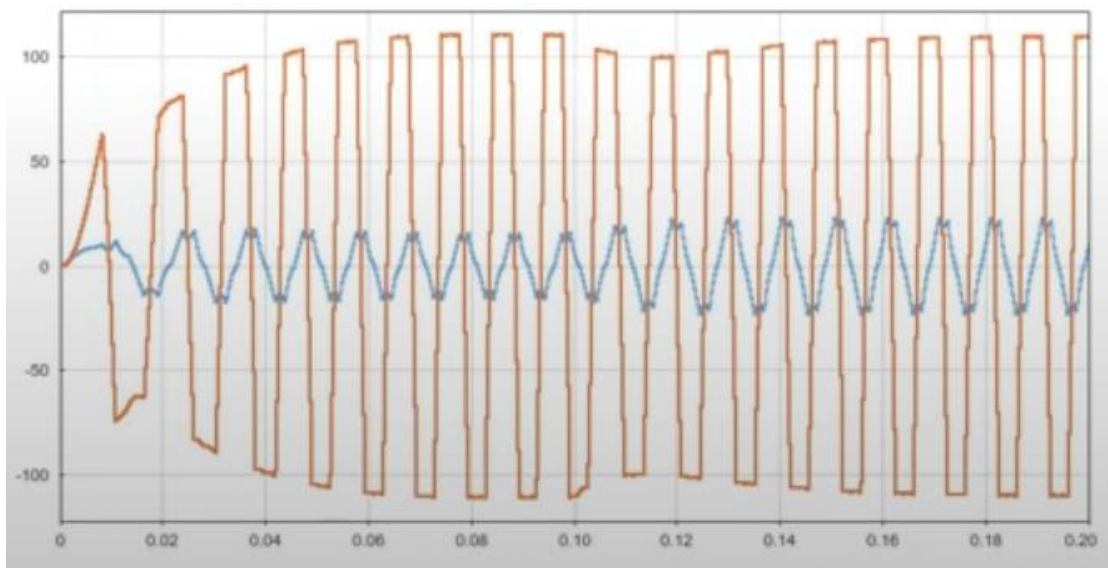


Рисунок 3.13 – Струм статору та зворотна ЕРС

Синім кольором зображено струм статору, помаранчевим – зворотна ЕРС статору.

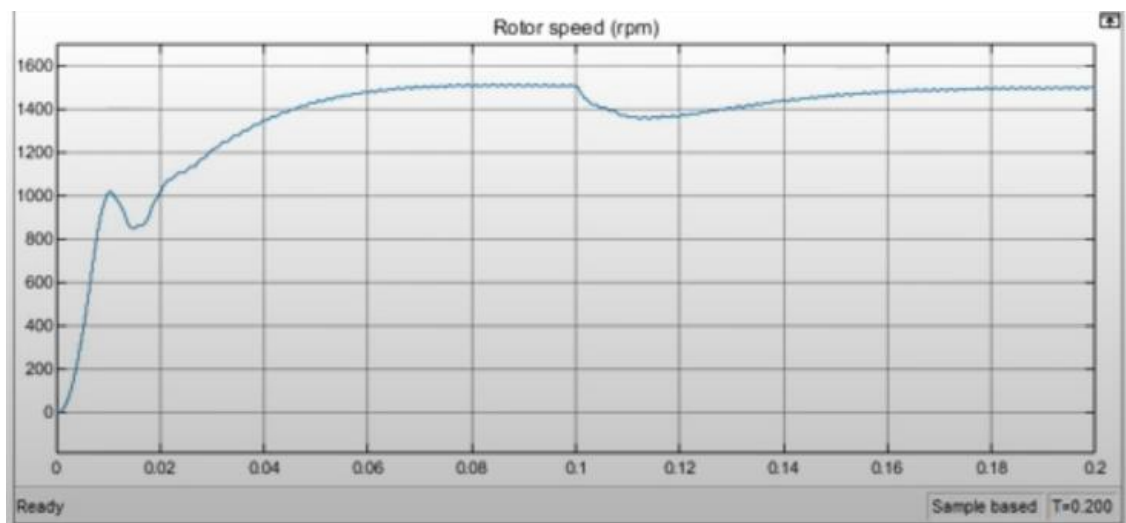


Рисунок 3.14 – Швидкість обертання

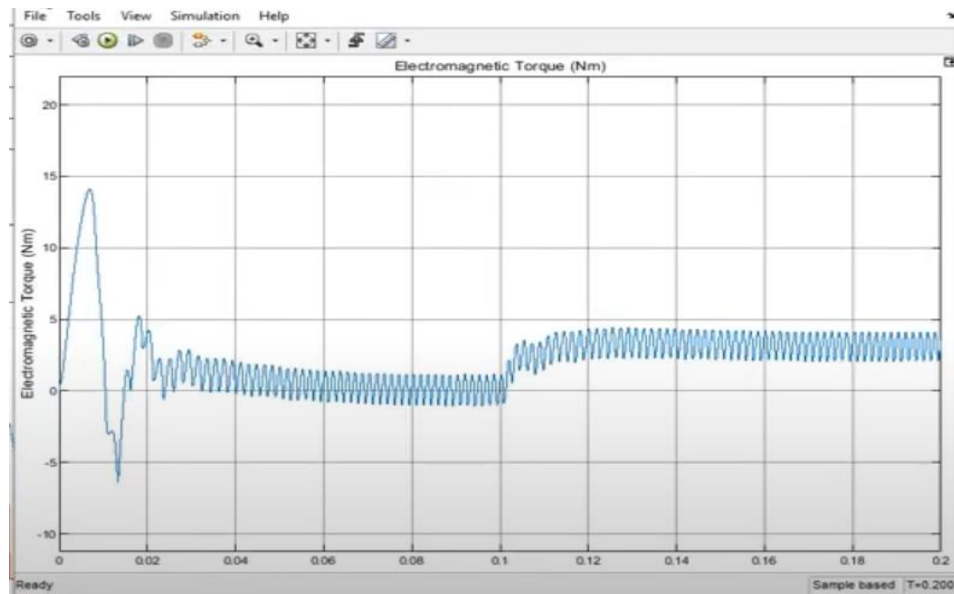


Рисунок 3.15 – Вихідний електромагнітний крутний момент

3.3 Симуляція Simulink-моделі з використанням гістерезисного керування струмом.

В даній моделі реалізовано гістерезисне керування струмом. На рисунку 3.16 зображена побудова блоку керування.

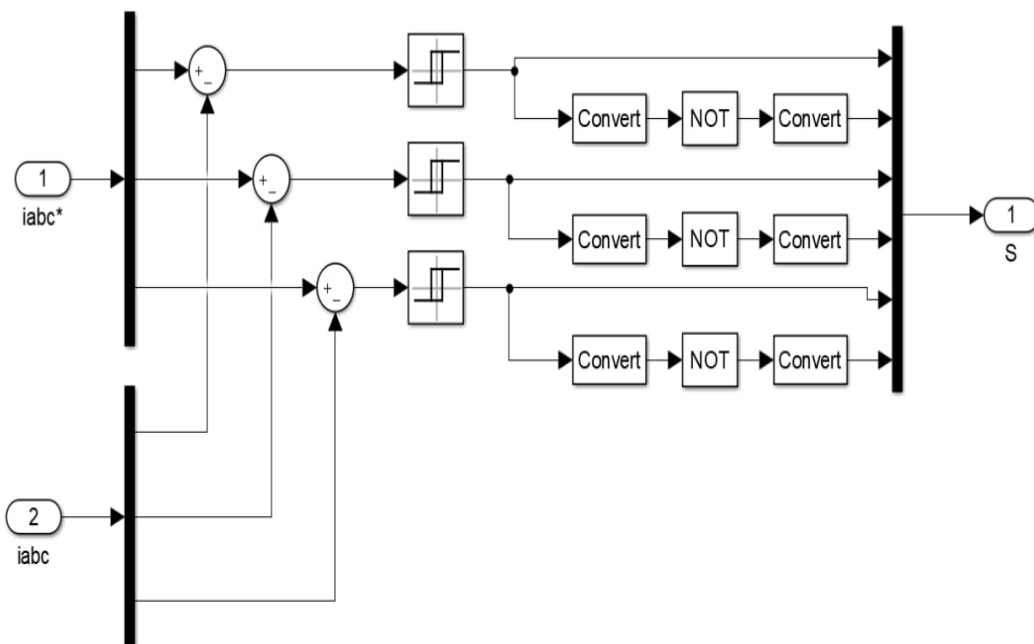


Рисунок 3.16 – Реалізація гістерезисного блоку керування

В блок приходить струм по зворотному зв'язку і порівнюється з еталонним значенням струму. За допомогою блоку Relay на виході отримується відповідне значення. Якщо значення струму досягло нижньої границі гістерезису, то в такому випадку, на виході струм буде зростати. Якщо ж навпаки, струм досяг верхньої границі, то в такому випадку, струм почне спадати до нижньої границі і так далі. Таким чином, струм обмежується в певному діапазоні і не зможе перевищити задане значення.

Просимулювавши модель отримані наступні результати: на рисунку 3.17 зображено графіки струму статора, зворотної ЕРС, швидкості обертання та вихідного крутного моменту.

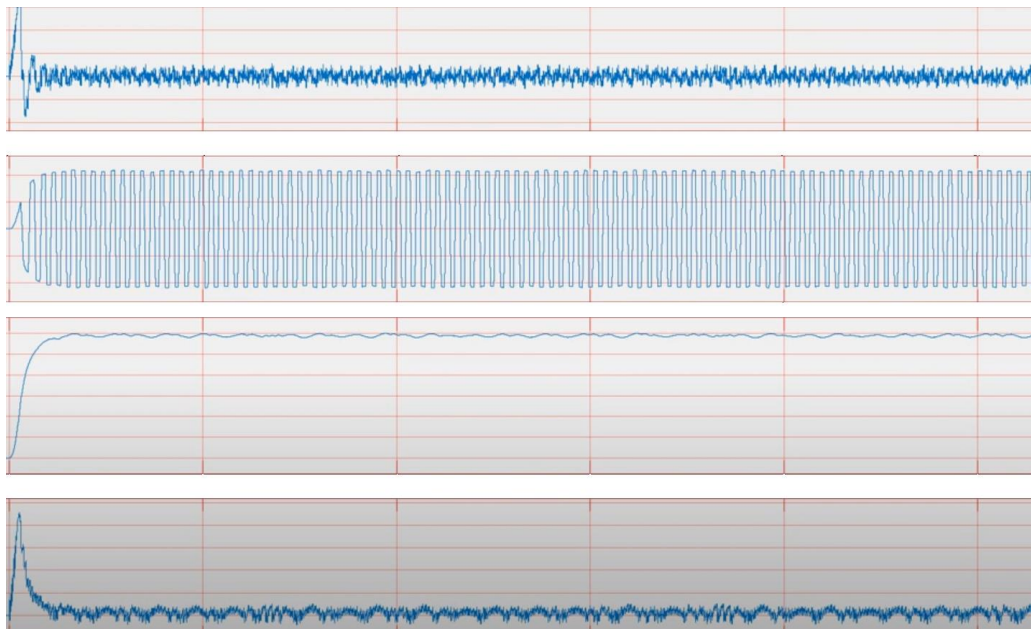


Рисунок 3.17 – Результати симуляції

Як видно з верхнього графіка, струм протягом всього проміжку часу варіюється від нижньої границі значень, до верхньої, що і потрібно було отримати. При цьому тільки при першому запуску системи струм перебільшує встановлене значення. Це зумовлено самою конструкцією двигуна. Також крутний момент має вже не такі круті перепади, як в минулих симуляціях. Швидкість обертання, можна сказати також майже не змінюється. Таким чином отримано більш надійну систему, струм якої не перебільшує максимального значення.

Висновки до розділу

В третьому розділі створенні та просимульовані три Simulink-моделі. Перша симуляція показує роботу самого двигуна без додавання будь-якої обв'язки. Отримані графіки струму статора, швидкості обертання та вихідного електромагнітного крутного моменту. З графіків видно, що пульсації струму значно впливають на швидкості обертання та крутний момент. Кожен з цих параметрів має пульсуючий характер.

В другому підрозділі просимульовано таку ж систему з додаванням ПІ-регулятора. Як видно з отриманих графіків, додавання такого регулятора дає позитивні наслідки. При першому запуску крутний момент мав вже не таке велике значення і з часом вирівнявся в робочий діапазон. Аналогічно і швидкість обертання. Варто відмітити, що пульсації все рівно присутні.

В третьому підрозділі розглянуто гістерезисне керування струмом. Отримані результати показали, що пульсації струму знаходяться в межах певного діапазону і ніколи виходять за його межі. Швидкість обертання та крутний момент мають вже не такі великі пульсації.

Також варто відмітити, що при трапецієподібній комутації ротор контролюється трьома датчиками Холла, які забезпечують інформацію про положення ротора кожні 60 градусів (а не постійно, як при синусоїдальній комутації). Це дає шість пульсацій крутного моменту за електричний цикл двигуна, або 12 пульсацій крутного моменту за кожен повний механічний оберт вала двигуна. Тому повністю позбутись пульсацій при використанні такого методу неможливо.

РОЗДІЛ 4. РОЗРОБКА СТАРТАП-ПРОЕКТУ

4.1 Опис ідеї розробки

Розробка стартап-проекту ґрунтується на результатах даної дисертаційної роботи. Ідея полягає у виробництві та збуті технічного виробу. Запропонований оптимізований трапецієподібний метод керування методом. Завдяки зміні ШІМ-керування на гістерезисне керування за струмом, з'явилась можливість обмежувати струм статора двигуна, а також зменшити пульсації вихідного крутного моменту. Таким чином, ці два ключові фактори підвищують надійність та стабільність роботи. Струм ніяким чином не зможе перевищити максимальне допустиме значення, оскільки існує верхня границя гістерезису, а отже, і сама система не вийде з ладу. Другий ключовий момент – це зменшення пульсації вихідного крутного моменту. Основний недолік трапецієподібного керування – це пульсації вихідного крутного моменту. Чим більші пульсації, тим більше з'являється так званих внутрішніх вібрацій. Через такий недолік система може працювати не стабільно і мати відхилення від заданих параметрів.

Далі послідовно розглянуто, проаналізовано та надано в таблицях 4.1 – 4.22 зміст ідеї, переваги та недоліки перед існуючими конкурентами. Проведений опис ідеї стартап-проекту, визначення його сильних та слабких сторін, проведений технологічний аудит ідеї проекту, аналіз ринкових можливостей проекту, розроблена ринкова стратегія проекту та проектування маркетингової програми стартап-проекту. Завершальним етапом став огляд на можливі області застосування й очікуваний ефект від стартап-проекту.

Таблиця 4.1 - Опис ідеї стартап-проекту

<i>Зміст ідеї</i>	<i>Напрямки застосування</i>	<i>Переваги для користувача</i>
	1. Використання оптимізованого методу для керування безколекторними двигунами.	Поява альтернативи у виборі методів керування.
	2. Створення готової продукції з використанням оптимізованого методу керування	Забезпечення надійності при експлуатації системи.

Висновки: в таблиці 4.1 наведені найважливіші напрямки використання рішення запропонованого в даній дисертаційній роботі. Потенціальними споживачами даної продукції можуть бути як звичайні люди, так і компанії, що виготовляють подібні вироби.

В наступній таблиці використовується шкала від 0 до 10.

Таблиця 4.2 - Визначення сильних, слабких та нейтральних характеристик

n/n	Техніко- економічні характеристики ідеї	(потенційні) товари/концепції конкурентів				W	N	S
		Мій проект	Конку- рент1	Конку- рент2	Конку- рент3			
1.	Собівартість	5	7	7	9			+
	Продуктивність	8	6	6	5			+
	Розмір	7	6	6	4			+
	Надійність	8	5	5	4			+
	Швидкість роботи	7	8	8	9	+		
	Вихідний крутний момент	4	6	6	7	+		
	Можливість обмеження струму	+	-	-	+		+	

В таблиці 4.2 W – слабка сторона (weak), N – нейтральна сторона (neutral), S – сильна сторона (strong).

Висновки: наведені найважливіші напрямки використання рішення запропонованого в даній дисертаційній роботі. Потенціальними споживачами даної продукції можуть бути як звичайні люди, так і компанії, що виготовляють подібні вироби.

4.2 Технологічний аудит ідеї проекту

Таблиця 4.3 – Технологічна здійсненність ідеї проекту

№	Ідея	Технології та реалізації	Наявність технології	Доступність технології
1.	Збільшення надійності роботи системи.	Обмеження максимального значення струму в системі за допомогою гістерезисного керування	Наявна	Доступна
2.	Зменшення пульсацій вихідного крутного моменту.	Проектування додаткових вихідних фільтрів	Наявна	Доступна.
3.	Виготовлення власної конструкції двигуна	Використання новітніх двигунів з конструкцією, що передбачає зменшенню пульсацій вихідного крутного моменту.	Наявна	Важко доступна
<p>Обрана технологія реалізації ідеї проекту: Виготовлення власної конструкції двигуна дуже складна та трудомістка операція. Тому доцільніше на вихід системи додати фільтрацію та збільшити надійність системи в цілому. Таким чином, ці технології забезпечать більш велику конкуренцію серед вже існуючих рішень.</p>				

4.3 Аналіз ринкових можливостей запуску стартап-проекту

Таблиця 4.4 - Попередня характеристика потенційного ринку стартап-проекту

	<i>Показники стану ринку (найменування)</i>	<i>Характеристика</i>
1.	Кількість головних гравців, од	3
2.	Загальний обсяг продаж, грн/ум.од	18000
3.	Динаміка ринку (якісна оцінка)	зростає
4.	Наявність обмежень для входу (вказати характер обмежень)	немає
5.	Специфічні вимоги до стандартизації та сертифікації	відсутні
6.	Середня норма рентабельності в галузі (або по ринку), %	65%

Висновки: аналізуючи дані з таблиці 4.4 можна сказати, що вихід на ринок є рентабельним, оскільки існує всього декілька головних гравців на ринку і, відповідно, конкуренція буде меншою. Також не малу роль грає територія, на яку йде вихід, відповідно, вихід на ринок в більш розвинених країнах буде складнішим.

Таблиця 4.5 - Характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту

<i>n/ n</i>	<i>Потреба, що формує ринок</i>	<i>Цільова аудиторія (цільові сегменти ринку)</i>	<i>Відмінності у поведінці різних потенційних цільових груп клієнтів</i>	<i>Вимоги споживачів до товару</i>
1.	Збільшення продуктивності	Приватний сектор	Інтеграція з існуючими системами, необхідність швидких систем	Продуктивність, енерго-споживання
2.	Підвищення надійності	Приватний сектор	Інтеграція з існуючими системами, необхідність надійних систем	Підвищена надійність товару
3.	Збільшення продуктивності та надійності	Приватний та державний сектори	Інтеграція з існуючими системами, необхідність надійних систем та більш швидкісних систем	Продуктивність, висока надійність

Висновки: ринок формується з урахуванням потреб, що формують

споживачі. Основними напрямками в даному випадку є надійність системи, та її продуктивність, відповідно, чим вищі ці показники, тим вищим буде попит на продукцію.

Таблиця 4.6 - Фактори загрози

<i>n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст загрози</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1.	Економічний	Загроза економічної кризи в країні-виробнику	Зміна країни-виробника або вкладення додаткових ресурсів
2.	Якісний	Неналежна якість зібраної системи	Зміна або розробка нових технологічних процесів виробництва
3.	Вартість комплектуючих	Вартість комплектуючих збільшується	Пошук нових постачальників або виділення додаткових ресурсів
4.	Конкуренція	Велика конкуренція і як наслідок подавлення власного бренду	Розробка нових технологій або реклама

5.	Світова пандемія	Епідеміологічна ситуація в країні	Виділення додаткових коштів для збереження здоров'я
----	------------------	-----------------------------------	---

Таблиця 4.7 - Фактори можливостей

<i>n/n</i>	<i>Фактор</i>	<i>Зміст можливості</i>	<i>Можлива реакція компанії</i>
1.	Збільшення попиту	Збільшення зацікавленості зі сторони потенційних покупців	Підвищення кількості виробництва товару
2.	Використання нових технологій	Покращення продукції шляхом оптимізації методів керування	Можливість розширення впливу компанії
3.	Збільшення різноманітності продукції	Додавання до систем нових функцій для розширення сфери використання	Дозволить відкрити нові відділи компанії для розробки нових пристроїв та технологій
4.	Робота на клієнтську базу	Створення спеціальної програми, яка дозволить приймати замовлення індивідуально для кожного нового покупця	Розширення сфери впливу компанії

5.	Співпраця з великими лідерами ринку	Можливість об'єднання з конкурентними компаніями	Розширення та вихід на новий рівень
----	-------------------------------------	--	-------------------------------------

Висновки: Розробка драйверів для керування різними електричними двигунами в нашій країні наразі не є надто поширеною. Тому створення окремих підприємств, що змогли б розробляти нові технології, удосконалювати застарілі методи. а також їх оптимізувати під різні задачі є досить актуальною. Особливо в час, коли стрімко розвивається електричний транспорт. Таким чином, створення нових, удосконалення старих та оптимізація методів керування зі застосуванням цих методів у побудові нових транспортних засобів, стало б дуже великою фінансовою допомогою для країни. З урахуванням вищесказаного на нові підприємства можна залучати іноземних інвесторів для розвитку такої інфраструктури в країні.

Таблиця 4.8 - Ступеневий аналіз конкуренції на ринку

<i>Особливості конкурентного середовища</i>	<i>В чому проявляється дана характеристика</i>	<i>Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)</i>
Тип конкуренції - чиста	Невелика кількість виробників	Створювати нові методики задля досягнення більшої продуктивності та підвищення надійності
За рівнем конкурентної боротьби - міжнародний	Вихід на ринок в різних державах, наявність виробників та замовників з інших країн	Вихід на міжнародний ринок
За галузевою ознакою - міжгалузева	Можливість використання продукції в різних галузях споживання	Введення рекламної кампанії товарів
Конкуренція за видами товарів – товарно-видова	Запропонований товар є одного виду	Прийняття рішень задля можливості швидкої адаптації до змін на ринку
За характеристиками конкурентних переваг - нецінова	Основним пріоритетом продукції є його надійність та продуктивність	Постійне вдосконалення технічних рішень та закупівлі комплектуючих задля покращення продукції

Продовження таблиці 4.8

<i>Особливості конкурентного середовища</i>	<i>В чому проявляється дана характеристика</i>	<i>Вплив на діяльність підприємства (можливі дії компанії, щоб бути конкурентоспроможною)</i>
За інтенсивністю - марочна	При постачанні продукції, особливо в інші країни, велику роль грає бренд компанії	Підвищення довіри компанії за допомогою виготовлення якісної продукції, а в майбутньому проведення потужної рекламної кампанії

Таблиця 4.9 - Аналіз конкуренції в галузі за М. Портером

<i>Складові аналізу</i>	<i>Прямі конкуренти в галузі</i>	<i>Потенційні конкуренти</i>	<i>Постачальники</i>	<i>Клієнти</i>	<i>Товаризамінники</i>
	Texas Instruments	NXP	Постачальниками комплектуючих може бути будь-яка довірена компанія.	Державний та приватний сектори	Драйвери для керування двигуном

Продовження таблиці 4.9

<i>Складові аналізу</i>	<i>Прямі конкуренти в галузі</i>	<i>Потенційні конкуренти</i>	<i>Постачальники</i>	<i>Клієнти</i>	<i>Товари-замінники</i>
<i>Висновки:</i>	В даному випадку конкуренція буде залежати від країни. В більш розвинутих країнах конкуренція буде вищою, в менш розвинутих – навпаки	Вихід на ринок у випадку малої кількості прямих конкурентів може бути не важким.	Постачальники комплектуючих можуть диктувати умови у випадку, якщо їх комплектуючі єдині на ринку	Клієнти мають потребу, задовольнити яку – задача компанії	З майбутнім розвитком технологій, з'являться нові, кращі технологічні товари на ринку

Таблиця 4.10 - Обґрунтування факторів конкурентоспроможності

<i>n/ n</i>	<i>Фактор конкурентоспроможності</i>	<i>Обґрунтування (наведення чинників, що роблять фактор для порівняння)</i>
1.	Собівартість	Чим нижча собівартість продукції, тим більша доступність для покупців
2.	Продуктивність	Розробляти нові технології, що призведе до підвищення продуктивності і, як висновок, продукція стає кращою у порівнянні з продукцією конкурентів
3.	Надійність	Підвищення надійності робить більшим рівень довіри покупців

Висновки: покращення таких показників як, продуктивність та надійність – позитивно відображатимуться у гонці конкуренції. Виходячи з таблиці 4.10, видно, що товар є конкурентоспроможним.

Таблиця 4.11 - Порівняльний аналіз сильних та слабких сторін проекту

<i>n/ n</i>	<i>Фактор конкурентоспроможності</i>	<i>Бали 1-20</i>	<i>Рейтинг товарів-конкурентів у порівнянні з Texas Instruments</i>						
			<i>-3</i>	<i>-2</i>	<i>-1</i>	<i>0</i>	<i>1</i>	<i>2</i>	<i>3</i>
1.	Собівартість	20							X
2.	Продуктивність	20		X					
3.	Надійність	20		X					

Таблиця 4.12 - SWOT-аналіз стартап-проекту

Сильні сторона: Низька собівартість Підвищена надійність Продуктивність	Слабкі сторони: Відносно складне проектування
Можливості: Вихід на міжнародний ринок Збільшення попиту в інших країнах	Загрози: Конкуренція Економічна нестабільність

Таблиця 4.13 - Альтернативи ринкового впровадження стартап-проекту

<i>n/ n</i>	<i>Альтернатива (орієнтований комплекс заходів) ринкової поведінки</i>	<i>Ймовірність отримання ресурсів</i>	<i>Строки реалізації</i>
1.	Індивідуалізм	Середня	15 місяців
2.	Кооперація	Висока	18 місяців
3.	Суперництво	Середня	24 місяців

Висновок: в даному випадку альтернативою для ринкового впровадження стартап-проекту обрано кооперацію. В такому існує найбільша ймовірність отримання додаткових ресурсів для розробки технологій та продукції.

4.4 Розроблення ринкової стратегії

Таблиця 4.14 - Вибір цільових груп потенційних споживачів

<i>n/ n</i>	<i>Опис профілю цільової групи потенційних клієнтів</i>	<i>Готовність споживачів сприйняти продукт</i>	<i>Орієнтовний попит в межах цільової групи (сегменту)</i>	<i>Інтенсивність конкуренції в сегменті</i>	<i>Простота входу у сегмент</i>
1.	Державний сектор	+	+	Середня	-
2.	Приватний сектор	+	+	Висока	+

Таблиця 4.15 - Визначення базової стратегії розвитку

<i>n/ n</i>	<i>Обрана альтернатива розвитку проекту</i>	<i>Стратегія охоплення ринку</i>	<i>Ключові конкурентоспроможні позиції до обраної альтернативи</i>	<i>Базова стратегія розвитку</i>
1.	Кооперація	Інтенсивний розподіл	Швидка адаптація до потреб потенційних покупців	Стратегія концентрації

Висновки: при стратегії інтенсивного розподілу та концентрації, з'являється можливість створити продукцію невисокої ціни та покращених характеристик при високому розподілі продажів.

Таблиця 4.16 — Стартові умови проекту

<i>n/n</i>	<i>Чи є проект «першопроходьцем» на ринку?</i>	<i>Чи буде компанія шукати нових споживачів, або забирати існуючих у конкурентів?</i>	<i>Чи буде компанія копіювати основні характеристики товару конкурента, і які?</i>	<i>Стратегія конкуренції поведінки</i>
1.	Не є першопроходьцем на ринку	Компанія націлена на здобуття своєї клієнтської бази шляхом, як залучення нових споживачів, так і забирання клієнтів у існуючих конкурентів	Компанія може копіювати основні характеристики конкурента	Стратегія виклику лідера

Висновки: в більшості країнах стартап-проект не буде першопроходьцем, але все залежить від конкретного регіону або країни. В менш розвинутих країнах, такий проект буде створено вперше, що дозволить швидко завоювати аудиторію споживачів. Сфера починає активно розвиватись, тому важливо швидко адаптуватись на ринку і завоювати довіру покупців.

Таблиця 4.17 - Визначення стратегії позиціонування

<i>n/n</i>	<i>Вимоги до товару цільової аудиторії</i>	<i>Базова стратегія розвитку</i>	<i>Ключові конкуренто- спроможні позиції власного стартап- проекту</i>	<i>Вибір асоціацій, які мають сформувати комплексну позицію власного проекту (три ключових)</i>
1.	Продуктивність	Стратегія спеціалізації	Продуктивна	Висока швидкодія роботи
2.	Надійність	Стратегія спеціалізації	Якість	Надійність роботи

Висновки: продуктивність та надійність системи є основними вимогами до вихідного товару. Висока швидкодія роботи та надійність при експлуатації – найбільший стратегічний пріоритет.

4.5 Розроблення маркетингової програми стартап-проекту

Таблиця 4.18 - Визначення ключових переваг концепції потенційного товару

<i>n/n</i>	<i>Потреба</i>	<i>Вигода, яку пропонує товар</i>	<i>Ключові переваги перед конкурентами (існуючі або такі, що потрібно створити)</i>
1.	Оптимізація методів керування та створення на цій базі нових пристроїв або транспортних засобів	Висока продуктивність та надійність	Ціна, продуктивність, надійність

Висновки: оскільки відомі ключові переваги концепції, відкривається можливість створення відповідної потужної рекламної кампанії.

Таблиця 4.19 - Опис трьох рівнів моделі товару

Рівні товару		Сутність та складові		
I. Товар за задумом		Оптимізовані методи керування дозволяють на своїй основі створити повноцінні пристрої, де потрібна підвищена надійність та продуктивність.		
II. Товар у реальному виконанні		Властивості/характеристики	М/Нм	Вр/Тх /Тл/Е/Ор
		Швидкодія	Залежить від потужності двигуна	Тх
		Вартість	80	Тх
		Якість: стандарт вологозахисту IPx8		
		Пакування: Система, документація користувача		
		Марка: Власна марка		
III. Товар із підкріплення м		До продажу – пристрій з потрібним для замовника функціоналом.		
		Після продажу – гарантійне обслуговування		
Товар захищатиметься шляхом його патентування				

Висновки: товар захищається шляхом патентування. Таким чином це компанія буде захищена від копіювання іншими компаніями.

Таблиця 4.20 - Визначення меж встановлення ціни

<i>n/ n</i>	<i>Рівень цін на товари замітники</i>	<i>Рівень цін на товари-аналоги</i>	<i>Рівень доходів цільової групи споживачів</i>	<i>Верхня та нижня межі встановлення ціни на товар/послугу</i>
1.	600-1500 у.о	600-2000 у.о	1500-7000 у.о.	500-800 у.о.

Висновки: на початку виробництва встановлене середнє значення цін. В такому випадку потенційного покупця не відлякає мала ціна, як показник неякісної продукції, і велика, як фактор великих витрат своїх ресурсів.

Таблиця 4.21 - Формування системи збуту

<i>n/ n</i>	<i>Специфіка закупівельної поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Функції збуту, які має виконувати постачальник товару</i>	<i>Глибина каналу збуту</i>	<i>Оптимальна система збуту</i>
1.	Продаж	Супровід товару до замовника	Нульового рівня	Безпосередній

Висновки: Цільовими каналами збуту є продаж продукції напряму до замовника, оскільки на старті компанії виробництво не буде настільки масштабним, щоб працювати з посередниками.

Таблиця 4.22 - Концепція маркетингових комунікацій

<i>n/n</i>	<i>Специфіка поведінки цільових клієнтів</i>	<i>Канали комунікацій, якими користуються цільові клієнти</i>	<i>Ключові позиції, обрані для позиціонування</i>	<i>Завдання рекламного повідомлення</i>	<i>Концепція рекламного звернення</i>
1.	Стрімкий розвиток електричного транспорту, спонукає цільових покупців рухатись завжди вперед. Як наслідок, бажання спробувати використати нову продукцію	Відеогайди на youtube.com, реклама	Підвищена надійність та висока продуктивність	Показати потенційним покупцям альтернативу у використанні різних методів керування	Демонстрація можливостей

4.6 Можливі області застосування та очікуваний ефект

Даний стартап-проект створений та розрахований на використання продукції як в домашніх умовах, так і для специфічних потреб. Основна область використання – для потреб, де потрібна підвищена надійність та стабільність. Очікуваний ефект даного проекту – це популяризація в країні розробки нових електричних транспортних засобів та використання більш надійного керування двигунами.

Висновки до розділу

Розроблено початковий етап створення стартап-проекту. Проведений опис ідеї стартап-проекту, описані основні його напрямки розвитку та переваги для користувача. Другим етапом в описі проекту стало визначення сильних, слабких та нейтральних сторін в порівнянні з конкурентами.

Наступним етапом розглянуто технологічний аудит проекту, проведений аналіз наявності та доступності технологій, що можуть в подальшому використовуватись в проекті.

Проведено аналіз ринкових можливостей стартап-проекту, описана початкова характеристика потенційного ринку. Проведений аналіз показав, що вихід на ринок буде рентабельним. Складена характеристика потенційних клієнтів стартап-проекту. Враховані фактори загрози для проекту та можливі реакції на них. Також враховані і фактори можливостей і реакція компанії на них. Проведений ступеневий аналіз конкуренції на ринку, особливості конкурентного середовища та вплив на діяльність підприємства. Обґрунтовано фактори конкурентоспроможності проекту.

Етапом далі розроблено ринкову стратегію проекту. Проведений вибір цільових груп потенційних споживачів та визначено базову стратегію розвитку. Проаналізовані стартові умови проекту та стратегії позиціонування.

Останнім етапом в створенні стартап-проекту стала розробка маркетингової програми. Визначено ключові переваги концепції потенційного товару. Встановлено цінові межі, сформовані системи збуту та створена концепція маркетингових комунікацій.

Загальний висновок

В дисертаційній роботі вирішено актуальну та важливу задачу – оптимізації та підвищення надійності методу керування безколекторним двигуном шляхом додавання ПІ-регулятора та використання гістерезисного керування струмом. Під час виконання науково-дослідної роботи отримані наступні результати:

1. Проаналізовані вже існуючі методи керування безколекторними двигунами, а саме метод послаблення поля, трапецієподібний, бездатчиковий, векторний методи та обґрунтовано доцільність використання трапецієподібного методу. Оскільки для реалізації трапецієподібного методу не потрібно використовувати багато ресурсів, як економічних, так і математичних обчислень.

2. Проведено дослідження вище обраного методу. Показані його недоліки. Таким чином, до суттєвих недоліків відносяться вихідні пульсації крутного моменту, за рахунок перемикання транзисторних ключів, а також неможливість обмежувати струм, що протікає в статорі.

3. Удосконалено метод додаванням ПІ-регулятора. Завдяки цьому з'являється можливість керувати швидкістю обертання й збільшується стабільність системи в цілому. Адже при зміні навантаження, система зможе вирівняти швидкість обертання і крутний момент

4. Запропоновано використання гістерезисного керування струмом. Завдяки цьому рішення, система матиме швидший динамічний відгук при зміні параметрів навантаження, забезпечення більшої пропускну здатності керування. Найбільшою перевагою стає підвищення надійності за рахунок обмеження струму в потрібному діапазоні.

5. Передостаннім результатом роботи стало створення Simulink-моделі та її симуляція в пакеті Matlab. Перша симуляція показує роботу самого двигуна при керуванні трапецієподібним методом. Друга частина розділу присвячена симуляції з додаванням ПІ-регулятора. Третя і завершальна

частина розділу показує результати симуляції при використанні гістерезисного керування струмом.

6. Останнім етапом дисертаційної роботи стала розробка стартап-проекту. Розроблено початковий етап створення стартап-проекту, розглянуто технологічний аудит проекту, проведено аналіз ринкових можливостей стартап-проекту, розроблено ринкову стратегію проекту, останнім етапом в створенні стартап-проекту стала розробка маркетингової програми. Як показав результаті, початковий стартап-проект є рентабельним.

Результати дисертаційних досліджень апробовано на Міжнародній науково-технічній XIII конференції молодих вчених «Електроніка-2020», м. Київ, квітень, 2020р.

За матеріалами дисертації опубліковано 1 друковану працю в збірнику матеріалів конференції (див. Додаток А):

Тимошенко Сергій. Електронне керування платформою з корисним навантаженням // «Електронна та акустична інженерія. Том №3», м. Київ, 2020р. – С.23-28

Використані джерела:

- [1] Бочкарев О.Е. Исследование свойств бесконтактных электродвигателей при импульсом формировании несинусоидальных токов: Автореф. дис. канд. техн. наук. М.: МАИ, 1978
- [2] Корельский Д.В., Потапенко Е.М., Васильева Е.В. Обзор современных методов управления синхронными двигателями с постоянными магнитами. *Радіоелектроніка. Інформатика. Управління*. 2001. С.155-158
- [3] Радиоуправляемые модели. Чем отличается коллекторный и бесколлекторный двигатель? URL: <https://distributions.com.ua/reviews/v-motor>
- [4] Разница между коллекторным и бесколлекторным двигателем URL: <https://dronomania.ru/faq/kollektornyj-i-beskollektornyj.html#i>
- [5] Вычужанин В. Система управления бесщеточным электродвигателем на основе логики FPGA *Современная электроника*. 2012. №5. С. 18-22
- [6] Решения компании IR для управления вентильными двигателями URL: <http://www.compel.ru/lib/ne/2011/10/6-bez-datchika-polozheniya-rotora-resheniya-kompanii-ir-dlya-upravleniya-ventilnyimi-dvigatelyami>
- [7] Urs Kafader – Sensorless control of brushless motors. URL: <https://drive.tech/en/stream-content/sensorless-control-of-brushless-motors>
- [8] Дмитрий Левкин – Инженерные решения. Векторное управление двигателем. URL: <https://engineering-solutions.ru/motorcontrol/vector/>
- [9] ПРИСТРІЙ КЕРУВАННЯ ТРИФАЗНИМ ЕЛЕКТРОДВИГУНОМ. URL: <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=24218&chapter=biblio>
- [10] ПРИСТРІЙ КЕРУВАННЯ НИЗЬКОВОЛЬТНИМ ЕЛЕКТРОДВИГУНОМ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ СЕРЕДНЬОЇ ПОТУЖНОСТІ. URL: <https://base.uipv.org/searchINV/search.php?action=viewdetails&IdClaim=124360&chapter=description>

- [11] Синхронный двигатель с постоянными магнитами URL: <https://engineering-solutions.ru/motorcontrol/pmsm/>
- [12] П-, ПИ-, ПД-, ПИД-регуляторы URL: <https://automation-system.ru/main/15-regulyator/type-of-control/90-408-p-pi-pid.html>
- [13] PID controller URL: https://en.wikipedia.org/wiki/PID_controller
- [14] Speed control of BLDC motor by using PID control and self-tuning fuzzy PID controller Mohammed Abdelbar Shamseldin, Adel A. EL-Samahy
- [15] Ahmed M. Ahmed, Faiz F. Areed Brushless DC Motor Speed Control using both PI Controller and Fuzzy PI Controller
- [16] R. Arulmozhiyal, and R.Kandiban "An Intelligent Speed Controller for Brushless DC Motor" presented at *Industrial Electronics and Applications (ICIEA)*, 2012 7th IEEE Conference on, 18-20 July 2012.
- [17] Tay, Teng-Tiow; Iven Mareels; John B. Moore (1997). High performance control. *Birkhäuser*. p. 93. ISBN 0-8176-4004-5
- [18] Ogata, Katsuhiko (1987). Discrete-time control systems. Prentice-Hall. p. 344. ISBN 0-13-216102-8.
- [19] S.-C. Tan, Y. Lai, and C. Tse, A family of PWM based sliding mode voltage controllers for basic DC-DC converters. *IEEE Int. Symp. on Circuits and Systems*, May 2006, pp. 257-260.
- [20] Y. Xiaobo, L. Xiao, and G. Yong. Sensor-less brushless dc motor control system design for electric vehicle. *Int. Conf. on Electronics, Communications and Control (ICECC)*. 2011
- [21] S. Maity. Dynamics and stability issues of a discretized sliding-mode controlled dc-dc buck converter governed by τ -event-time switching. *IEEE Trans. Circuits Syst.* vol. 60, no. 6
- [22] Скользящий режим URL: [ru.wikipedia.org > wiki > Скользящий_режим](http://ru.wikipedia.org/wiki/Скользящий_режим)
- [23] P. Krein. Geometric control for power converters. *1st ed. New York, NY:Oxfors Univ. Press.* 1998

- [24] Zare, F.; Ledwich, G. A hysteresis current control for single-phase multilevel voltage source inverters: PLD implementation. *IEEE Trans. Power Electron.* 2002
- [25] Buso, S.; Fasolo, S.; Malesani, L.; Mattavelli, P. A dead-beat adaptive hysteresis current control. *IEEE Trans. Ind. Appl.* 2000
- [26] Poulsen, S.; Andersen, M.A.E. Hysteresis controller with constant switching frequency. *IEEE Trans. Consum. Electron.* 2005

Електронне керування платформою з корисним навантаженням

Тимошенко С. В., ORCID [0000-0003-4825-0335](https://orcid.org/0000-0003-4825-0335)

Кафедра конструювання електронно-обчислювальної апаратури kcoo.kpi.ua
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського» kpi.ua
Київ, Україна

Анотація.—В даній статті розглянуто організацію керування платформою з корисним навантаженням. Під словом керування розуміється: центрування платформи в «0», поворот платформи на заданий кут зі сталою швидкістю, безперервне обертання платформи за та проти часової стрілки, команди старт/стоп, поправка на вітер. При розробці електронної системи використовуються сучасні електронні компоненти. В якості корисного навантаження може виступати професійна екшн-камера. Система розрахована на універсальність у використанні.

Ключові слова. — обертання платформи; електронне керування; BLDC-двигун; обертальний трансформатор.

Вступ

Останніми роками зростає популярність та попит на вироби, що мають електричний двигун. До таких кінцевих продуктів можна віднести електромобілі, електровелосипеди, самокати, тощо. А серед молоді і не тільки, все більше і більше з'являється людей, що займаються фотографією, зйомкою відеореєстрації та іншими видами фото та відео-зйомки. Оскільки, іноді процес зйомки може тривати годинами чи днями, в різну погоду та час дня, використання зручного штативу може викликати деякі незручності та проблеми. Тому доцільно створити систему, що могла б керувати відносно невеликою платформою. Така система включатиме в себе електричний двигун і екшн-камеру як приклад корисного навантаження на платформу, що обертатиметься. При цьому не обов'язково, щоб людина знаходилась поруч. Таке рішення дозволяє вести зйомку в умовах поганої погоди. Система, що пропонується до розгляду, має набір достатніх функцій, щоб вести зйомку. При цьому зручність панорамних зйомок і таймлапсів зростає в рази.

1. АНАЛІЗ РИВКУ

Переважаюча кількість готової продукції схожої тематики має конкретне призначення у користуванні і не може бути використана деінде. Як правило, таких універсальних систем мало і виготовляються вони на конкретне замовлення. Наприклад, поворотний штатив-платформа Time Lapse компанії Puluz [1] (Рис. 1), що виробляє продукцію для фото та відео-зйомки, являє собою невеликий штатив, у верхній частині якого розташовується блок керування. В заявленій характеристиці дозволяється закріплювати навантаж не більше 1 кг, що є надто малою вагою. Фактично, таке обмеження говорить про те, що більше ніж смартфон чи малогабаритну камеру закріпити на штативі не вда-

ється. Функціонал пристрою дозволяє обертати платформу на 360 градусів [2], але при цьому обертання відбувається тільки на фіксований кут повороту, що також накладає певні обмеження користувачеві.

До недоліків відноситься неможливість контролю швидкості обертання платформи, а це, в свою чергу, впливатиме на продуктивність роботи кінцевого користувача. Досить важливу роль грає і те, що виробники такої продукції економлять на електронних компонентах системи, що в майбутньому відобразиться на терміні придатності пристрою.

До переваг можна віднести малогабаритність системи та відносно зручність у її використанні. Але в той же час функціонал розглянутого вище пристрою надто обмежений.



Рис. 1 Штатив компанії Puluz



Copyright (c) 2020 Тимошенко С. В.

Існують і інші виробни, що мають подібний принцип роботи. Сюди відносяться обертальні підставки для: кондитерських та ювелірних виробів, 3D фото- та відео-зйомки, демонстрації товарів на виставках, показу експонатів в музеях та інших подібних закладах.

Як висновок можна сказати, що за рахунок використання якісних і надійних електронних компонентів та розширення функціональних можливостей системи, можна створити кінцеву продукцію, рівень якої буде вищим, ніж той, що наразі існує на ринку.

II. ПРОБЛЕМАТИКА

Основна проблема такої продукції знаходиться в її реалізації, вартості електронних компонентів та інтересу звичайних користувачів. Відповідно попит на такий прилад може дещо знизитись. В той же час, немало важливу роль грає і універсальність створеної системи. Вона призначена не тільки для екшн-камер чи звичайних смартфонів. В якості корисного навантаження на платформу може виступати будь-що, чому потрібен обертальний рух. В результаті на виході з'явиться універсальний пристрій, надійність якого буде вищою, ніж представлених моделей на ринку. В загальному такі системи не надто розповсюджені і потрібні для виконання специфічних і, в деяких випадках, складних завдань, що потребують не тільки обертання платформи, а і електронного блоку, що буде обробляти велику кількість інформації.

III. ОПИС МОДЕЛІ

Фізично представлена система складатиметься з:

- Безколекторного двигуна постійного струму
- Обертального трансформатора
- Платформи, що буде обертатись
- Електронного блоку керування.

В свою чергу блок електроніки та обробки даних складатиметься з:

- Драйверу для керування двигуном.
- Мікросхеми для обробки даних обертаючого трансформатора.
- SoC-процесору.

Всі ці комплектуючі зібрані в блок та встановлені на жорстку тринику. Таке рішення дозволить використовувати систему в більш агресивному середовищі.

На Рис. 2 зображена структурна схема системи.

В спрощеному вигляді принцип роботи системи можна описати наступним чином. SoC-процесор посилає сигнал драйверу, що керує BLDC-двигуном. Драйвер запускає міст з шести польових транзисторів в правильній послідовності і двигун починає обертатись. Швидкість обертання та напрям задає процесор і передає драйверу. В свою чергу двигун з'єднаний з обертальним трансформатором (резольвером), що слугує для зчитування кута повороту валу двигуна. Дані з обертального трансформатора, що перетворює

синусоїдальні сигнали в електричну напругу, поступають на спеціалізовану мікросхему, що обробляє їх і передає до процесору.

Щоб користувач зміг бачити всі необхідні параметри системи та нею керувати, надалі буде розроблений спеціальний додаток написаний на мові C та Verilog.

Система повинна мати достатній набір рішень, що зможуть забезпечити наступні функції:

- Правильний запуск безколекторного двигуна постійного струму.
- Керування напрямом обертання двигуна.
- Керування швидкістю обертання.
- Обертання з постійною швидкістю.
- Центрування положення платформи при ініціалізації системи.
- Можливість адаптування обертання під час сильного вітру.

Для першого прототипу такої системи використовується безколекторний двигун постійного струму з потужністю 105 Ватт, максимальною швидкістю обертання 4000 г/хв та обертаючим моментом 0,25 Н*м.

Для керування двигуном використовується мікросхема-драйвер [3]. Такий вид електронних компонентів мають підвищену надійність. В них передбачені спеціально призначені лінії для захисту від короткого замикання, перевищення за струмом та напругою, неправильного увімкнення та подання сигналів на транзисторний міст, що в свою чергу являє собою кінцевий автомат з шістьма станами, що також грає ключову роль в керуванні двигуна.

Важливо не забувати про силову частину керування двигуном. Як правило, проектування силовій частині починається з вибору транзисторів. Найкраще для таких цілей підходять польові MOSFET транзистори [4].

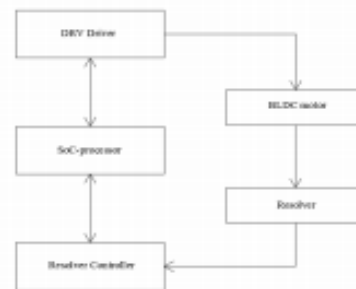


Рис. 2 Структурна схема



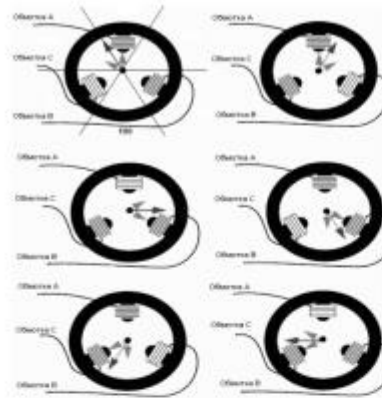


Рис. 3 Порядок комутації обмоток

При виборі транзисторів необхідно знати максимально можливий струм і величину напруги, від якої живиться двигун [5]. В більшості випадків транзистори вибираються з коефіцієнтом запасу 2-2,4 по струму. Також дуже важливим параметром в транзисторах є опір відкритого транзистору. Його величина варіюється в межах декількох мОм. Просте правило: чим менший внутрішній опір транзистора, тим краще [6]. Адаже в момент перемикачів плечей транзисторів, потужність різко зростає і, відповідно, починає виділятися велика кількість тепла. З формули (1) видно: якщо внутрішній опір транзистора буде більшим, то потужність зростає, а, отже, і більше тепла буде виділятися на транзисторі. Тому важливо не забувати про розсіювання тепла. Щоб завадити перегріву і виходу з ладу транзисторів, є необхідність ставити радіатор.

$$P = R_{ds} \cdot I_d^2 \quad (1)$$

де P – потужність, R_{ds} – внутрішній опір транзистора, I – струм.

Необхідно і пам'ятати про такий параметр, як Dead Time. Він грає немалу роль в правильному функціонуванні керування двигуном. Dead time – це затримка, яка потрібна для того, щоб всі транзистори, які потрібно, закрилися та закінчилися перехідні процеси [7]. Такою затримкою повинен керувати сам драйвер.

За допомогою драйверу буде керуватись швидкість обертання платформи та напрям. Зустрічаються драйвери в яких всередині встановлені датчики Холла. З їх допомогою можна отримати більше інформації про швидкість обертання двигуна та положення валу. Також і на деяких електричних моторах встановлені датчики Холла [8]. Тому задля уникнення надлишковості у функціоналі компонентів необхідно це враховувати.

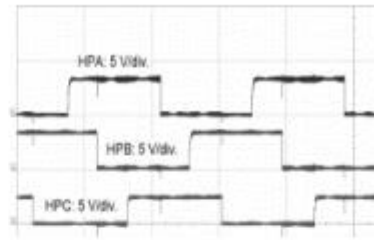


Рис. 4 Часова діаграма

ТАБЛИЦЯ 1 Інформація у датчиків

Значення датчиків Холла	Фаза
101	A-B
001	A-C
011	B-C
010	B-A
110	C-A
100	C-B

В якості драйверу для двигуна застосовується мікросхема компанії Texas Instruments – DRV8306. В ній є весь необхідний функціонал.

Робота двигуна полягає в послідовному включенні певних пар обмоток таким чином, щоб вектори двох магнітних полів були ортогональними один до одного. Покрокове увімкнення таких пар призведе до руху ротора за часовою або проти часової стрілки [9]. На Рис. 3 зображений порядок увімкнення обмоток. Важливо відмітити, що увімкнення обмоток повинно бути в суворій послідовності, адже від цього залежить коректність роботи двигуна. При неправильному поданні напруги на обмотки, ротор почне робити короткі «стрибки» в різні сторони і не зрушиться з місця. Такий тип керування дозволяє набрати швидкість протягом короткого часу, але при цьому не дозволяє керувати двигуном плавно.

При подачі постійного струму на обмотку, вона стає електромагнітом. В результаті, коли котушки знаходяться під напругою, протилежні полюси ротора та статора починають притягуватись один до одного. Коли полюси наблизяться один до одного, вмикається інша пара обмоток, протилежні полюси знову починають притягуватись і так крок за кроком. На Рис. 4 зображена часова діаграма роботи датчиків Холла.

В Таблиця 1 наведена інформація увімкнення ключів в залежності від сигналів датчиків Холла.

До двигуна під'єднується точний обертаючий трансформатор ЛШЗ.010. Він має доволі малу похибку вимірів і складає всього 0,05%. А клас точності при випробуваннях склав 0,05 за офіційним паспортом.

Обертаючий трансформатор використовується в якості зворотного зв'язку і слугує для перетворення кута повороту валу двигуна в електричну напругу.



амплітуда якої пропорційна або взагалі є функцією синуса або косинуса кута [10]. Для роботи такого компоненту необхідний додатковий підсилювач з великим коефіцієнтом підсилення, так як вихідна потужність сигналу обертаючого трансформатора мала. На Рис. 5 зображений обертаючий трансформатор.

Дані з трансформатора надходять до спеціалізованої мікросхеми, що оброблює дані і передає до SoC-процесору. І вже за допомогою розробленого додатку користувач зможе побачити, на який кут повернулася платформа.

ВИСНОВКИ

Представлена система перш за все розрахована на універсальне використання як в повсякденному житті, так і для специфічних задач. Розглянута система добре підходить для дуже тривалої зйомки на смартфон чи камеру.

Якщо до такої системи додати обчислювальний блок, то функціонал та сфера використання зростуть на порядки. Наприклад, за допомогою спеціального обчислювального блоку і обертаючої платформи можна розрахувати акустику потрібного приміщення. Іншими словами система відкриває ціле поле для експериментів у її використанні. А простий спосіб керування буде тільки сприяти цьому.

Також варто відмітити, що при використанні описаних в статті компонентів та написаному додатку система стає надійною у експлуатації. Іншими словами, друга складова, на яку орієнтована представлений пристрій – це надійність.



Рис. 5 Обертаючий трансформатор ЛШЗ 010

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

- [1] "ELEKTRONNYY POVOROTNYY SHITATIV TIME-LAPSE PULUZ PU362L [ELECTRONIC ROTARY TRIPOD TIME-LAPSE PULUZ PU362L]." For-extreme. [Online]. Available: <https://for-extreme.com.ua/stom/stands/puluz-pu362l-rotarimic-360/>
- [2] "PULUZ Electronic 360 Degree Rotation," Puluz, 2019. [Online]. Available: <http://www.puluz.com/product/view.do?itemNo=PU362L>
- [3] "Driving of TI: Upravlyay lyubym elektrodvigatelem [TI Drivers: Drive Any Electric Motor]." Texas Instruments, 2016. [Online]. Available: <https://www.ti.com/pt/zh/74977>
- [4] B. Check, "Switched On: MOSFET Selection Guide," 2017. [Online]. Available: <https://www.bondar.com/resource-library/switched-on-mosfet-selection-guide>
- [5] "BLDC motor and controller theory," 2014. [Online]. Available: <https://hackaday.io/project/1176-gate-quad-log/11051-bldc-motor-and-controller-theory>
- [6] S. THORNTON, "Metal Oxide Field Effect Transistor: What is RDS(on)?" 2017. [Online]. Available: <https://www.micromach.com/news/mosfets-what-is-rds-on-faq/>
- [7] Radmkulak, "PWM control and Dead Time Insertion," 2014. [Online]. Available: <https://hackaday.io/project/1176-gate-quad-log/11741-pwm-control-and-dead-time-insertion>
- [8] "What are Brushless DC Motors," Renesas. [Online]. Available: <https://www.renesas.com/us/en/support/technical-resources/engineer-school/brushless-dc-motor-iii-overview.html>
- [9] S. Mishyn, "Upravleniye beskollektornym dvigatelem po signalam obratnoy EDS – ponimaniye protessa [Brushless motor control based on reverse emf signals - understanding of the process]." Hahr, 2016. [Online]. Available: <https://hahr.com.ua/post/700469/>
- [10] "Resolver (electrical)." Wikipedia. [Online]. Available: [https://en.wikipedia.org/wiki/Resolver_\(electrical\)](https://en.wikipedia.org/wiki/Resolver_(electrical))



Electronic Control of Platform with Payload

Tymoshenko S.V., ORCID [0000-0003-4825-0335](https://orcid.org/0000-0003-4825-0335)

Faculty of Electronics

National Technical University of Ukraine "Igor Sikorsky Kyiv Polytechnic Institute"

Kyiv, Ukraine

Abstract—This article proposes an idea for developing a hardware complex and software for electronic control of a payload platform. As such a load, there can be anything that needs rotating motion, be it a camera, a smartphone, an electronic computing unit, an antenna, and so on. Physically, the system is a rigid tripod on which the platform is located. The rotation of the platform gives a brushless DC motor. The motor is controlled by a special driver, which was previously software and hardware configured. It is important not to forget the power part of the engine control. Generally, the design of the power section begins with the selection of transistors. MOSFETs are best suited for this purpose. When choosing transistors, you need to know the maximum current and the voltage from which the motor is powered. In most cases, the transistors are selected with a power factor of 2-2.4 current. To obtain data on the rotation of the angle of the motor shaft, a rotating transformer connected to a special controller is required. All output from the motor driver and the rotary transformer controller comes to the SoC processor. With it, the user will be able to control the system as a whole. The use of electronic components from electronics giants such as: Texas Instruments and Intel FPGA will increase the reliability of the system during operation. The system is also designed for versatility in operation.

In a simplified form, the principle of operation of the system can be described as follows. The processor sends a signal to the driver that controls the engine. The driver starts the bridge of six field effect transistors in the correct sequence and the motor starts to rotate. The processor sets the rotation speed and direction and passes it to the driver. In turn, the motor is connected to a rotary transformer, which serves to read the angle of rotation of the motor shaft. Data from a rotary transformer that converts sinusoidal signals into electrical voltage is supplied to a specialized microcircuit, which processes them and transfers them to the processor.

The finished system should provide the user with such functionality: the correct start of the brushless DC motor, control of the direction of rotation of the motor, speed control, rotation at a constant speed, centering the platform position during system initialization, the ability to adapt rotation during strong winds.

To increase the functionality of the system, you can add to it a computing unit, which will be a separate board with its own processor. This will allow you to use the device for more complex tasks.

Keywords — *electronic control; BLDC-motor; resolver.*

